차 례

자료

참고

일화

머리말

위대한 령도자 **김정일**대원수님께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《물리학을 선차적으로 발전시켜야 합니다. 물리학을 선차적으로 발전시켜야 나라의 과학기술을 빨리 발전시켜나갈수 있습니다.》

우리 조국의 륭성번영과 강성국가건설을 다그치기 위하여서는 나라의 과학기술을 전반적으로 세계적수준에 올려세워야 한다. 그러자면 현대과학기술의 기초로 되는 물리지식을 폭넓고 깊이있게 소유하고 적극 활용해나가야 한다.

6학년에서는 우선 정보기술의 기초지식인 력학적진동과 파동, 빛속도로 진행되는 전기진동과 전자기파, 빛파동과 빛량자지식을 배우게 된다.

다음으로 세계의 물질적시원과 그 운동을 밝혀주는 원자핵과 소립자지식, 모든 최신과학기술의 발전과 밀접히 련관되여있는 나노기술에 대하여 배우게 된다.

이러한 내용들은 눈부시게 발전하고있는 현대과학과 기술의 성과들을 옳바로 리해하고 쉽게 받아들이며 더욱 발전시켜나가는데서 기초적이며 필수적인 지식으로 된다.

학생들은 현대물리지식의 중요성을 깊이 자각하고 배우고 배우고 또 배워 경애하는 **김정은**선생님의 령도따라 강성국가를 건설하는 믿음직한 역군으로 튼튼히 준비해나가야 한다.

제1장. 력학적진동

력학적진동에 대한 지식은 모든 물리적현상들과 현대과학기술의 중요한 지식으로 된다. 력학적진동에 대한 지식이 없이는 기계공학, 무선공학, 건축공학을 비롯하여 정보과학기술에서 제기되는 과학기술적문제들을 원만히 처리할수 없다.

이 장에서는 진동을 특징짓는 량들을 취급한데 기초하여 가장 단순한 진동인 조화진동과 용수철흔들이 및 질점흔들이의 진동, 강제진동과 공진에 대하여 취급한다.

제1절. 진동과 그것을 특징짓는 량

우리 주위에는 그네의 운동이나 가야금줄, 기타줄의 운동처럼 같은 운동을 반복하는 물리적현상들이 많다.

같은 운동이 반복되는 현상들을 어떤 물리적량들로 특징짓겠는가.

진동과 그 원인

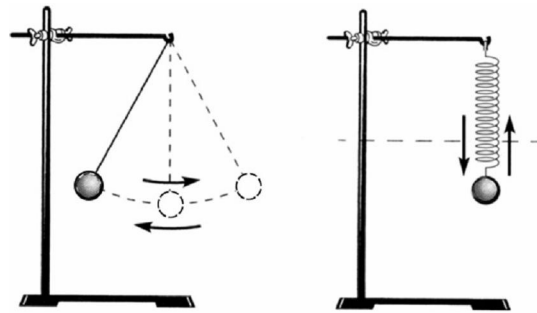
❓ 같은 운동이 반복되는 현상들에서 공통점은 무엇인가.

실 험

○ 평형자리에 멎어있는 흔들이의 추를 옆으로 약간 밀었다가 놓아본다.(그림 1-1의 ㄱ) 추는 평형자리를 중심으로 왔다갔다한다.

○ 용수철의 한끝에 매달려 평형자리에 멎어있는 추를 아래로 약간 당겼다가 놓아본다.(그림 1-1의 ㄴ) 이 경우에도 추는 평형자리를 중심으로 오르내린다.

그림 1-1. 실과 용수철에 매달린 추의 운동

이처럼 물체가 평형자리를 중심으로 왔다갔다 하는 운동을 **력학적진동** 간단히 **진동**이라고 부른다.

그러면 진동은 왜 일어나는가.

흔들이의 추는 평형자리에서 벗어나면 평형자리로 향하는 중력의 성분힘 F 를 받는다.(그림 1-2)

마찬가지로 용수철에 매달려 진동하는 추도 평형자리에서 벗어나면 평형자리로 향하는 튐힘을 받는다.(그림 1-3)

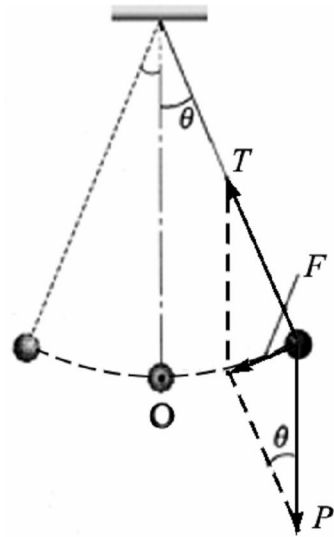
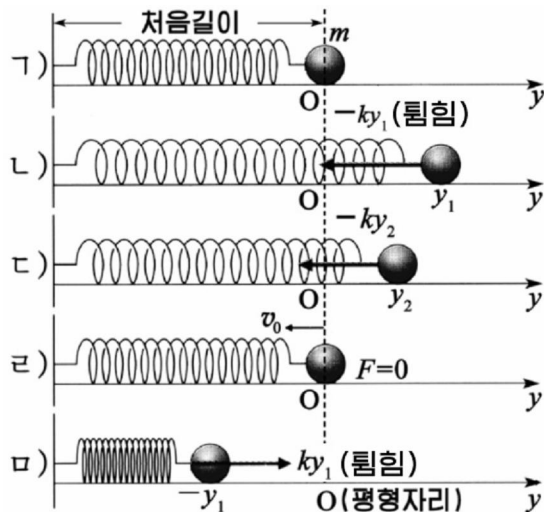
이와 같이 물체를 평형자리로 되돌아가게 하는 힘을 **되돌이힘**이라고 부른다.

그림 1-2. 흔들이에서 진동이 일어나는 원인

평형자리에서 벗어난 추는 되돌이힘때문에 평형자리에서 멀리 벗어나지 못하고 얼마쯤 갔다가 되돌아온다.

추가 평형자리에 오면 되돌이힘은 령으로 된다. 그러나 추는 관성때문에 평형자리에 멎지 않고 계속 운동하여 평형자리를 벗어났다가 되돌이힘에 의해 되돌아온다.

그림 1-3. 용수철에서 진동이 일어나는 원인

이처럼 <u>진동은 평형자리에서 벗어난 물체에 평형자리에로 되돌려보내는 되돌이힘이 작용하고 평형자리에서 멎지 않고 계속 운동하려는 물체의 관성이 있기때문에 일어난다.</u>

진동을 특징짓는 량

진동은 일정한 시간을 두고 운동이 되풀이되는 특징을 가지므로 진폭, 진동주기, 진동수와 같은 물리적량들로 특징짓는다.

진폭. 진동하는 물체는 언제나 일정한 범위안에서 운동한다. 진동하는 물체가 평형자리에서 제일 멀어졌을 때의 변위가 **진폭**이다.

임의의 시각에 물체의 변위(평형자리로부터 물체까지의 거리)

는 언제나 진폭보다 클수 없다.(그림 1-4)

진동주기. 물체가 한번 완전히 진동하는데 걸리는 시간이 **진동주기**(간단히 **주기**)이다.

진동주기의 단위는 1s이다. 이것은 물체가 한번 진동하는데 1s의 시간이 걸린다는것을 의미한다.

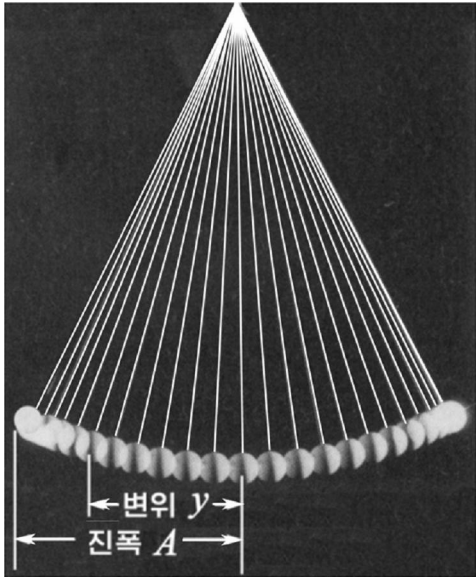
진동수. 물체가 1s동안에 진동하는 회수가 **진동수**(또는 **주파수**)이다.

진동수의 단위는 1Hz이다. 1Hz는 1s동안에 한번 진동할 때의 진동수와 같다. 즉

$$1\mathrm{Hz}=1\mathrm{s}^{-1}$$

그림 1-4. 진폭과 변위

진동주기와 진동수는 물체가 얼마나 빨리 진동하는가를 나타내는 량이다. 진동수와 진동주기사이에는 다음의 관계가 있다.

$v=\dfrac{1}{T}$	진동수와 진동주기사이의 관계

진동하는 물체의 특성량들을 직관적으로 보여줄수 없겠는가.

실험

○ 색감을 묻힌 붓이나 잉크를 넣은 펜을 설치한 추를 아래우로 또는 좌우로 흔들고 그옆이나 밑에서 종이테프를 등속으로 이동시킨다.(그림 1-5)

○ 곡선이 새겨진 종이테프의 길이방향으로 가로축을 그리고 시간을 표시하며 그 세로축에 변위를 표시한다.

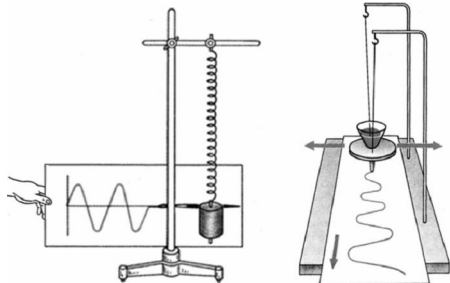



그림 1-5. 용수철과 흔들이에 매달린 추의 진동그라프

종이테프에 새겨진 곡선은 무엇을 보여주는가. 곡선은 진동하는 물체의 변위가 시간에 따라 어떻게 변하는가를 보여준다.

진동하는 물체의 변위나 그밖의 물리적량들의 시간에 따르는 변화를 보여주는 곡선을 **진동그라프**라고 부른다.

흔히 진동그라프는 시간에 따르는 변위값들을 얻어 점들로 표시하는 방법이나 진동하는 물체에 기록장치를 설치하는 방법으로 그린다.

진동하는 물체에 기록장치를 설치하고 진동을 기록하는 방법은 실천에서 널리 리용된다. 병원에서 리용하는 심전계(그림 1-6), 지진을 관측하는 지진계(그림 1-7) 등은 이런 방법으로 진동을 기록한다.

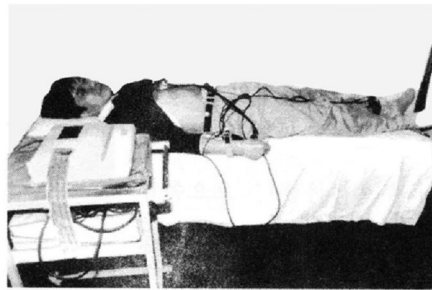
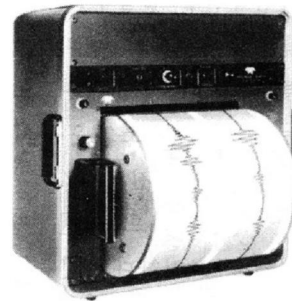



그림 1-6. 심전계　　　　그림 1-7. 지진계

자유진동과 고유진동

한번 준 외부힘에 의하여 일어나는 진동을 **자유진동**이라고 부른다.

자유진동은 공기의 저항이나 마찰력과 같은 운동을 방해하는 저항힘때문에 오래 계속되지 못하고 멎는다.

저항힘은 없고 되돌이힘만 있는 자유진동을 **고유진동**이라고 부른다.

리상적인 고유진동은 없으며 공기저항이나 마찰력과 같이 운동을 방해하는 힘이 매우 작아 무시된다면 자유진동을 고유진동으로 볼수 있다.

문제

1. 다음의 문장에서 틀린 문장을 찾고 그 근거를 밝혀라.

ㄱ) 모든 물체는 평형자리에서 벗어나면 진동한다.

ㄴ) 고유진동은 언제나 진폭, 진동수, 진동주기가 일정하다.

ㄷ) 흔들이의 되돌이힘은 변위에 관계없이 일정하다.

ㄹ) 고유진동에서 되돌이힘은 시간에 관계없이 일정하다.

2. 우리 주위에서 진동현상을 5가지이상 찾고 되돌이힘을 밝혀라.

3. 다음의 경우에 진동그라프를 그려라.

ㄱ) 일정한 높이에서 바닥에 떨어뜨린 탁구공이 드림면우에서 진동하는 경우

ㄴ) 마찰력이 없는 수평면우에 서로 평행으로 마주 세운 두개의 드림면사이에서 구가 수평방향으로 진동하는 경우

4. 그림 1-8에서 물우에 떠있는 시험관을 눌렀다 놓으면 아래우로 진동한다. 어떤 힘의 작용으로 시험관이 진동하는가를 말하고 되돌이힘을 지적하여라.

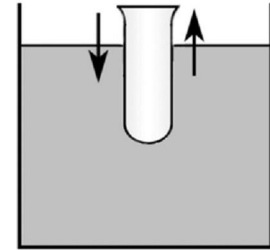



그림 1-8

제2절. 조화진동

진동중에서 가장 단순한 진동은 조화진동이며 임의의 복잡한 진동은 다른 몇개의 조화진동들로 나누어 고찰할수 있다.

그러면 조화진동은 어떤 진동이며 어떻게 표시할수 있는가.

조화진동

되돌이힘만을 받는 용수철흔들이의 고유진동을 등속원운동하는 물체의 그림자의 운동과 비교하여보자.

실 험

○ 그림 1-9와 같은 장치에서 용수철에 매단 추를 $A=$ OM만큼 우로 올렸다가 놓아준다.

○ 전동기로 구 M의 회전수와 용수철흔들이의 진동수가 같아지도록 조절한다.

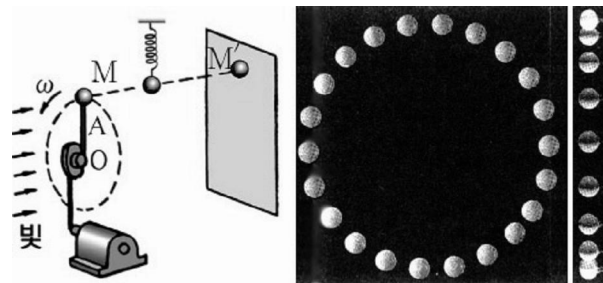



그림 1-9. 등속원운동하는 물체의 그림자의 운동과 추의 진동

실험으로부터 추의 진동은 등속원운동하는 구의 그림자의 운동으로 바꾸어 고찰할수 있다는것

을 알수 있다.

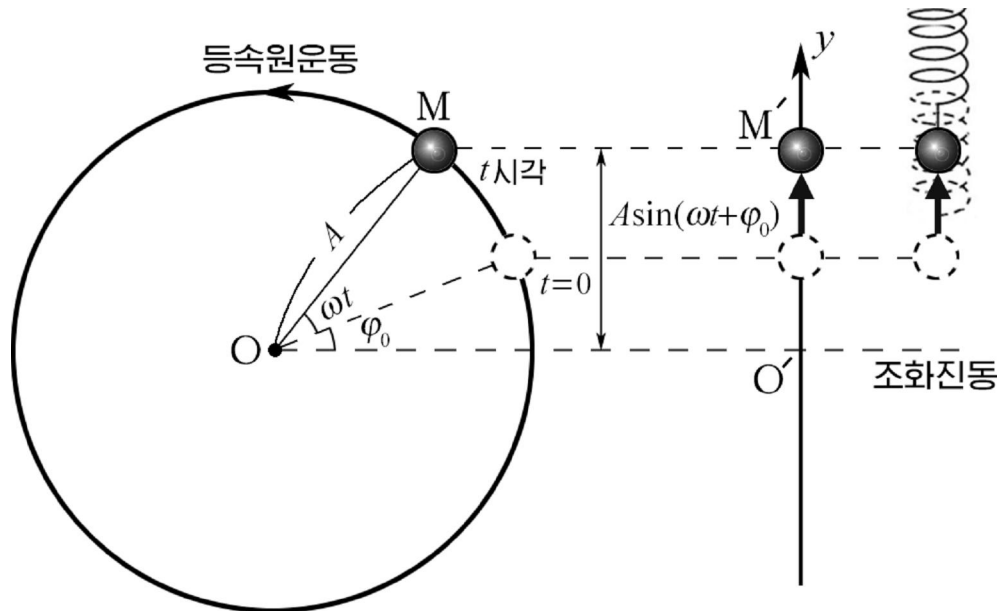



그림 1-10. 등속원운동에서 반경의 y축성분과 조화진동

그림 1-10에서 구 M이 일정한 각속도 ω로 돌기때문에 t시각에 회전각은 $\varphi=\omega t+\varphi_0$이며 구 M과 회전중심을 잇는 반경 A의 시누스값은 그림자 M′가 중심 O′로부터 벗어난 거리 y(변위)와 같다. 그러므로 용수철에 매달린 추가 진동하는 모양은 다음과 같이 표시된다.

$$y = A\sin(\omega t+\varphi_0) \quad \text{조화진동식} \qquad (1)$$

식 1에서 $\varphi_0=0$이면 t시각에 회전각은 $\varphi=\omega t$로 되며 M′의 변위(또는 추의 진동모양)는 다음과 같다.

$$y=A\sin\omega t$$

이와 같이 시간에 따르는 변위가 시누스(또는 코시누스)함수로 표시되는 진동을 **조화진동**이라고 부른다.

조화진동은 진폭, 진동수가 일정하므로 시간이 지나도 진동모양이 변하지 않는다.

자리각과 자리각차

자리각. 조화진동식에서 시누스함수안의 값 $\varphi=\omega t+\varphi_0$을 진동의 **자리각**이라고 부른다. 여기서 $t=0$일 때의 자리각 φ_0을 **처음자리각**이

라고 부른다.

진폭이 주어졌을 때 자리각 φ를 알면 그 시각에 진동하는 물체의 자리와 운동방향을 알수 있다.

그림 1-11과 같은 용수철흔들이에서 자리각이 $\varphi=0$이면 물체는 평형자리($y=0$)에서 웃방향으로 운동하며 자리각이 $\varphi=\pi$이면 평형자리($y=0$)에서 아래로 운동한다.

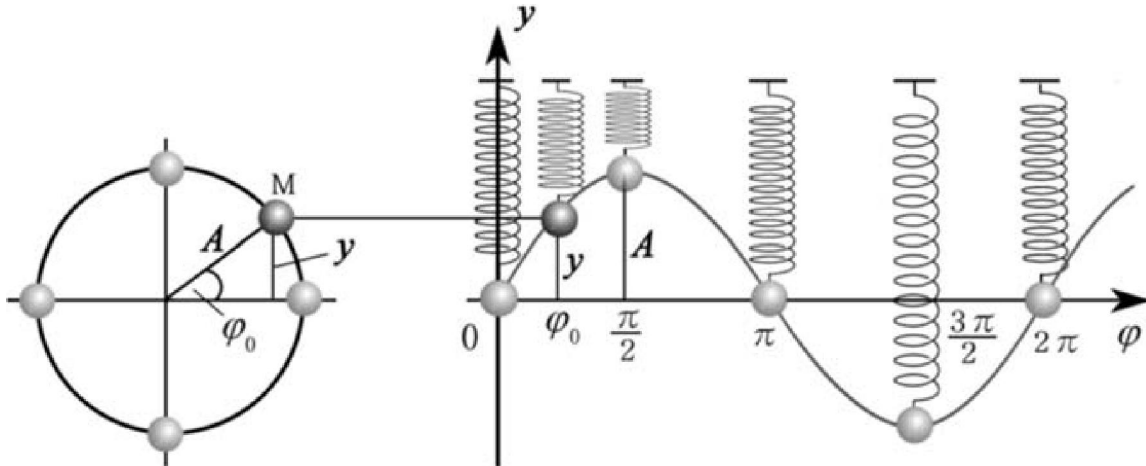



그림 1-11. 자리각과 변위 및 운동방향사이의 관계

또한 자리각이 $\varphi=\pi/2$이면 최대로 눌린 상태($y=A$)에서 물체가 멎어있고 $\varphi=3\pi/2$이면 최대로 늘어난 상태($y=-A$)에서 멎어있다.

조화진동식에서 ω는 단위시간동안에 생긴 자리각의 변화를 나타내는 량으로서 **각진동수**라고 부른다.

각진동수는 등속원운동에서의 각속도와 같이 표시된다. 즉

$$\omega=\frac{2\pi}{T}=2\pi\nu \quad \text{각진동수와 주기, 진동수사이의 관계} \tag{2}$$

자리각차. 두개이상의 진동을 동시에 고찰할 때에는 그것들의 자리각이 어떻게 차이나는가를 따져보게 된다. 두 진동의 자리각들의 차 $\Delta\varphi=\varphi_1-\varphi_2$을 두 진동의 **자리각차**라고 부른다.

두 진동의 자리각차가 $\Delta\varphi=2k\pi$ ($k=0, 1, 2, \cdots$)로 일정하면 두 물체는 진동한 수가 k만큼 차이나며 늘 같은 방향으로 진동한다. 이때 두 물체는 **같은자리각으로 진동한다**고 말한다.(그림 1-12)

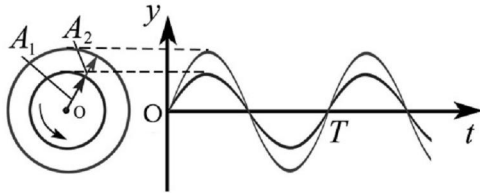



그림 1-12. 같은자리각으로 진동하는 두 물체의 진동그라프

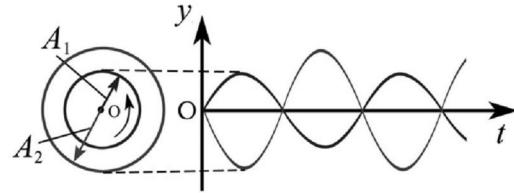



그림 1-13. 반대자리각으로 진동하는 두 물체의 진동그라프

두 진동의 자리각차가 $\Delta\varphi=(2k+1)\pi(k=0,\ 1,\ 2,\ \cdots)$로 일정하면 두 물체는 진동한 수가 $k+1/2$만큼 차이나며 늘 반대방향으로 진동한다. 이때 두 물체는 **반대자리각으로 진동한다**고 말한다.(그림 1-13)

<u>같은 진동수를 가진 두 조화진동의 자리각차는 언제나 일정하며 처음자리각차와 같다.</u> 즉

$$\Delta\varphi=\varphi_1-\varphi_2=(\omega t+\varphi_{01})-(\omega t+\varphi_{02})=\varphi_{01}-\varphi_{02}=\text{일정}$$

그러나 진동수가 다른 두 조화진동의 자리각차는 시간에 따라 변한다.

문제

1. 다음의 문장에서 틀린 문장을 찾아보아라.

ㄱ) 고유진동은 조화진동이다.

ㄴ) 조화진동은 시간에 따라 주기적으로 변하는 진폭을 가진다.

ㄷ) 조화진동은 진폭, 주기, 자리각이 항상 일정한 진동이다.

ㄹ) 조화진동에서 되돌이힘의 방향은 언제나 변위의 방향과 일치한다.

2. 각진동수가 같은 두 조화진동이 있다. 첫 진동의 변위가 령과 같은 순간부터 둘째 진동의 그라프를 그려라. 첫 진동은 자리각이 $\dfrac{\pi}{2}$(혹은 π, $\dfrac{3}{2}\pi$, 2π)만큼 앞섰다.

3. 진동식 $y=0.03\sin(1.5\pi t+\frac{\pi}{2})$[m]로 표시되는 조화진동의 진폭, 진동수, 주기, $t=4$s인 때의 자리각과 물체가 움직인 거리를 구하여라.

제3절. 흔들이의 고유주기

모든 물체는 자기의 고유한 진동수, 진동주기를 가진다.

용수철흔들이의 고유주기

용수철흔들이의 고유주기가 무엇에 관계되는가를 실험으로 알아보자.

실 험

○ 튐성결수와 구의 질량이 각각 같은 두 용수철흔들이를 서로 다른 진폭으로 진동시킬 때 어느 흔들이가 더 빨리 진동하는가를 살펴본다.(그림 1-14의 ㄱ) 두 흔들이는 꼭같이 진동한다.

○ 튐성결수가 같고 구의 질량이 다른 두 용수철흔들이를 같은 진폭으로 진동시킬 때 어느 흔들이가 더 빨리 진동하는가를 살펴본다.(그림 1-14의 ㄴ) 질량이 작은 용수철흔들이가 더 빨리 진동한다.

○ 튐성결수가 다른 두 용수철에 같은 질량의 구들을 각각 달고 같은 진폭으로 진동시킬 때 어느 흔들이가 더 빨리 진동하는가를 살펴본다.(그림 1-14의 ㄷ) 튐성결수가 큰 용수철흔들이가 더 빨리 진동한다.

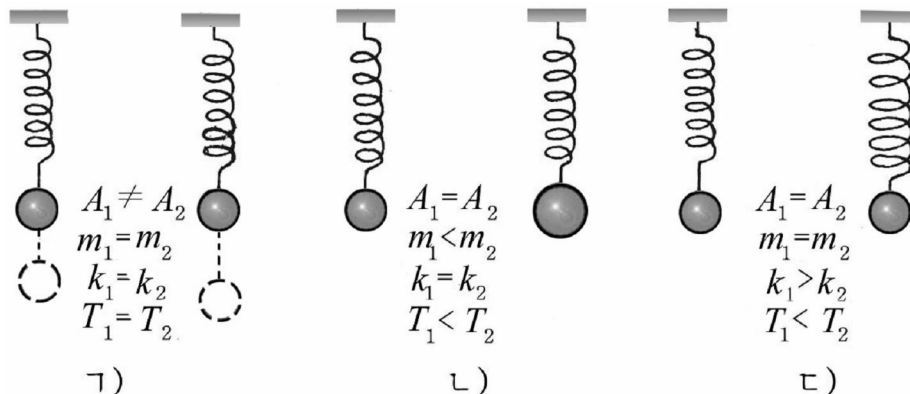



그림 1-14. 용수철흔들이의 진동주기는 구의 질량과 용수철의 튐성결수에 관계된다

실험으로부터 무엇을 알수 있는가.

용수철흔들이의 고유주기는 진폭에는 관계없고 추의 질량이 클수록, 용수철의 퉘성결수가 작을수록 크다는것을 알수 있다. 즉

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{k}} \quad \text{용수철흔들이의 고유주기} \qquad (1)$$

즉 용수철흔들이의 진동주기는 매단 물체의 질량의 1/2제곱에 비례하고 퉘성곁수의 1/2제곱에 거꿀비례한다.

생각하기 용수철흔들이에서 용수철의 퉘힘의 자리에네르기와 추의 운동에네르기가 서로 전환된다는 사실로부터 고유주기를 어떻게 구할수 있는가?

질점흔들이의 고유주기

물체의 질량에 비하여 실의 질량을 무시할수 있고 실이 늘어나지 않으며 그의 길이에 비하여 매단 물체의 크기가 훨씬 작은 흔들이를 **질점흔들이(수학흔들이)**라고 부른다.

질점흔들이의 진동주기가 무엇에 관계되는가를 실험으로 알아보자.

실 험

○ 실의 길이가 같고 추의 질량이 같은 두 흔들이를 서로 다른 진폭으로 진동시켜 진동주기를 비교해보자.(그림 1-15의 ㄱ) 진동주기는 같다.

○ 실의 길이는 같고 추의 질량이 다른 두 흔들이가 같은 진폭으로 진동하게 하고 진동주기를 비교해보자.(그림 1-15의 ㄴ) 진동주기는 같다.

○ 질량이 같은 추들을 길이가 서로 다른 실에 매단 두 흔들이를 같은 진폭으로 진동하게 하고 진동주기를 비교해보자.(그림 1-15의 ㄷ) 길이가 길수록 진동주기는 길다.

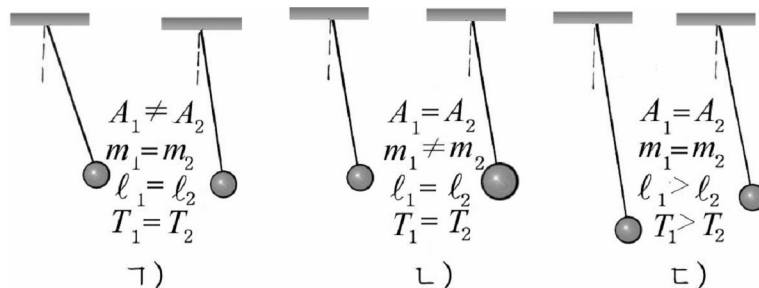



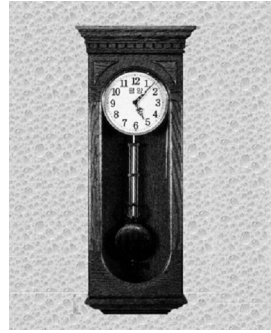
그림 1-15. 흔들이의 진동주기는 실의 길이에만 관계된다

이로부터 무엇을 알수 있는가.

흔들이의 진동주기는 오직 실의 길이에만 관계되고 추의 질량이나 진폭에는 관계되지 않는다. 이것이 **흔들이의 등시성**이다.

흔들이의 등시성은 추시계를 만드는 기초원리로 되고있다.(그림 1-16)

그림 1-16. 추시계

질점흔들이의 고유주기는 용수철흔들이의 되돌이힘과 질점흔들이의 되돌이힘을 비교하여 구하면 다음과 같다.

$$T=2\pi\sqrt{\frac{\ell}{g}} \quad \text{질점흔들이의 고유주기} \qquad (2)$$

즉 질점흔들이의 진동주기는 흔들이의 길이의 1/2제곱에 비례하고 중력가속도의 1/2제곱에 거꿀비례한다.

질점흔들이의 고유주기공식은 흔들이의 등시성을 잘 증명해준다.

질점흔들이의 진동주기를 재면 중력가속도 g의 값을 결정할수 있다. 중력가속도값은 위도에 따라 다르며 같은 위도에서도 지각의 조성에 따라 다르다. 무거운 광물들이 매장된 곳은 g의 값이 크고 원유와 같이 밀도가 작은 물질들이 매장된 곳은 g의 값이 작다.

이처럼 중력가속도값을 재여 지하자원을 탐사하는 방법을 **중력탐사법**이라고 부른다.

문제

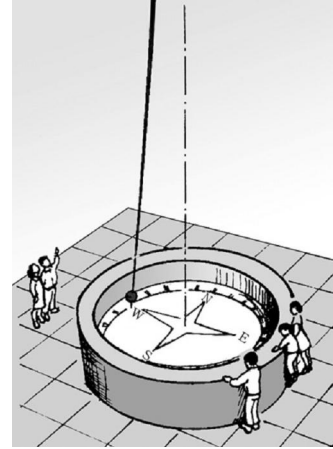
1. 달에서의 중력가속도는 지구에서의 중력가속도의 1/6밖에 안된다. 지구에서 정확한 추시계를 달에 가져가면 분침이 하루에 몇바퀴 돌아가겠는가?
2. 질량이 각각 75g인 두 물체로 용수철흔들이와 질점흔들이를 만들었다. 질점흔들이에서 ℓ=0.3m이면 용수철의 툄성결수 k가 얼마여야 두 흔들이의 진동주기가 같겠는가?

푸코흔들이

그림 1-17. 푸코흔들이

질점흔들이를 오래동안 흔들리게 하면 지구의 자전운동에 의하여 그의 진동면이 돌아간다.

실례로 극단한 경우로서 북극에서 질점흔들이를 흔들리게 하면 지구는 서쪽에서 동쪽으로 돌아가므로 진동면은 우에서 내려다보면 시계바늘이 도는 방향으로 돌아가게 된다.

푸코는 1851년에 길이 67m인 실에 28kg인 추를 달고서 이 실험을 하여 지구가 자전운동을 한다는것을 발견하였다. 이 흔들이를 푸코흔들이라고 부른다.(그림 1-17)

제4절. 강제진동과 공진

감쇠진동

고유진동은 되돌이힘만을 받으면서 진행되는 리상적인 진동이다. 그러나 실제적인 진동은 이러저러한 외부힘을 받으면서 진행된다. 공기속에서 진동하는 물체는 진동과정에 공기저항을 극복하면서 일을 하므로 진폭이 점차 줄어들어 나중에는 멎고만다.

이처럼 시간이 지남에 따라 진폭이 점점 줄어드는 진동을 **감쇠진동**이라고 부른다.

그림 1-18에서 보는것처럼 감쇠진동에서 저항이 클수록 진폭은 더 빨리 줄어든다.

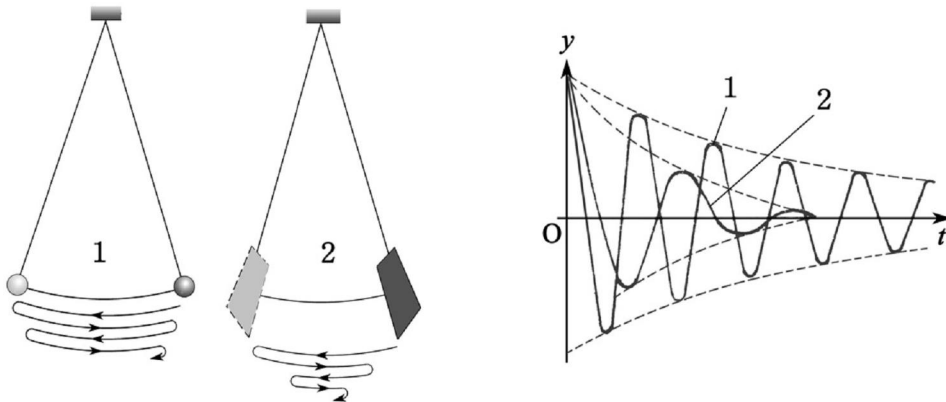



그림 1-18. 감쇠진동의 진동그라프

강제진동

그네를 뛸 때처럼 밖으로부터 외부힘을 주기적으로 작용하면 저항력을 극복하는데 소비되는 에네르기가 보충되므로 진동이 계속 진행된다.(그림 1-19)

그림 1-19. 강제진동

이처럼 주기적으로 변하는 외부힘에 의하여 일어나는 진동을 **강제진동**이라고 부른다.

강제진동을 일으키는 주기적인 외부힘을 **강제힘**, 강제힘의 진동수를 **강제진동수**라고 부른다.

❓ 강제진동의 진동수와 진폭이 무엇에 관계되는가.

실 험

○ 그림 1-20과 같은 장치에서 손잡이를 일정한 주기로 돌리면서 용수철흔들이의 주기와 비교해본다. 용수철흔들이는 손잡이를 돌리는 주기와 같은 주기로 진동한다.

○ 손잡이를 점점 빨리 돌리면서 용수철흔들이의 진동수와 진폭의 변화를 살펴본다. 진동수가 커지며 진폭도 변한다.

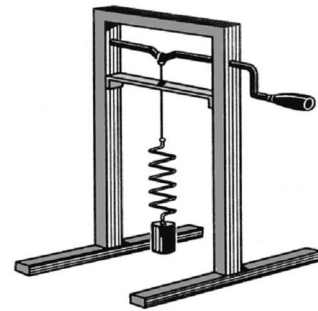



그림 1-20. 강제진동의 주기는 외부힘의 주기와 같다

실험으로부터 무엇을 알수 있는가.

강제진동은 물체의 고유진동수와는 관계없이 강제힘의 진동수와 같은 진동수로 일어나며 진폭은 진동수에 따라 달라진다는것을 알수 있다.

공진

강제진동의 진폭은 어떤 때 제일 커지겠는가.

실 험

○ 그림 1-21과 같이 수평으로 늘인 평평한 줄에 몇개의 질점흔들이를 설치한다.

○ 흔들이 1을 진동시키고 다른 흔들이들의 진동과정을 살펴보아라. 흔들이 1과 길이가 꼭같은 흔들이 2의 진폭이 제일 크며 흔들이 4의 진폭이 제일 작다.

※ 질점흔들이의 고유진동수는 흔들이의 길이에 관계된다.

그림 1-21
흔들이에서의 공진

실험을 통하여 무엇을 알수 있는가.

강제진동수가 물체의 고유진동수와 같을 때 진폭이 특별히 큰 강제진동이 일어나며 그 차이가 클수록 진폭이 더 작다는것을 알수 있다.(그림 1-22)

그림 1-22. 강제진동의 진폭과 진동수사이의 관계

이처럼 강제진동수가 물체의 고유진동수와 같을 때 진폭이 최대로 커지는 현상을 **공진**이라고 부른다.

진동하는 물체가 저항을 받으면서도 진폭이 줄어들지 않고 계속 진동하려면 저항을 극복하는데 쓴 에네르기를 매 주기마다 강제힘이 일을 하여 보충해주어야 한다.

생활과 기술에서 공진을 잘 고려하여야 한다. 건물이나 다리, 기계 등에서 공진이 일어나면 파괴될수 있다. 기차가 철다리를 지나갈 때 이음짬에 부딪치는 기차바퀴의 충격은 주기적인 강제힘으로 된다. 이 강제힘의 진동수가 철다리의 고유진동수에 가까우면 철다리의 진폭이 커지는데 지어 철다리가 파괴될수도 있다.

기계가 동작할 때 부속품의 운동(례하면 피스톤의 운동과 기계축의 회전)에 의하여 주기적인 강제힘이 생긴다. 강제힘의 진동수가 그 기계 혹은 받친 물체의 고유진동수에 가까우면 공진이 일어나 파손될수 있다.

같은 리치로 건물마다 자기의 고유진동수를 가지고있는데 그것이 지진의 진동수에 가까우면 지진피해를 받을수 있으므로 건물을 설계할 때 지진의 진동수와 건물의 고유진동수가 같지 않게 해야 하며 될수록 그 차가 크게 설계해야 한다.

기차레루의 길이는 ℓ, 기차차체의 무게는 P이고 기차바퀴에 설치한 용수철의 튐성결수는 k이다. 기차의 속도가 얼마일 때 레루의 이음부에서 바퀴의 충격에 의한 기차차체의 공진이 일어나겠는가?

문제

1. 강제진동의 진동수가 강제힘의 진동수와 같게 되는것은 무엇때문인가?
2. 길이가 $\ell=0.5$m인 질점흔들이에 진폭이 일정한 강제힘을 작용시켜 흔들이의 진폭을 최대로 하자면 강제힘의 진동수가 얼마여야 하겠는가?
3. 흔들이벽시계에서는 왜 흔들이의 진동이 잦아들지 않는가?

일화 다리가 무너진 원인

1831년에 어느 한 나라의 기병부대는 전투에서 이기고 돌아오다가 다리를 건너가게 되였다. 기병들이 힘차게 다리를 건너가는데 갑자기 다리중간에서 다리가 와르르 무너져 모두 강물속에 빠져들고말았다.(그림 1-23)

그림 1-23. 다리가 무너진 원인

그 당시 이 현상의 원인을 밝히지 못하고있다가 수십년이 지나서야 물리학자들이 이 사건을 해명하였다. 다리가 무너진 원인은 무엇이겠는가?

복습문제(1)

1. 20g의 분동을 매달면 3cm 늘어나는 용수철이 있다. 그 웃끝을 고정시키고 아래끝에 5g의 추를 더 달고 0.5cm만큼 당겼다놓으면 추는 진동한다. 늘어나기 전 용수철의 아래끝으로부터 4.25cm, 3.75cm, 3.25cm 되는 곳에서 되돌이힘의 크기와 방향을 결정하여라.

(**답.** 0.033N 우로, 0, 0.033N 아래로)

2. 그림 1-24와 같이 r=5cm 떨어져있는 두 점 A와 B에 $q_A = q_B = 2\times10^{-13}$C을 가진 대전체들이 놓여있다. 그사이의 중심에 $q_0 = -5\times10^{-13}$C인 구를 놓고 드림선방향으로 약간 옮겼다놓으면 대전체는 드림선방향에서 진동한다. 평형자리로부터 0.1mm 떨어진 점에서 되돌이힘을 구하여라.

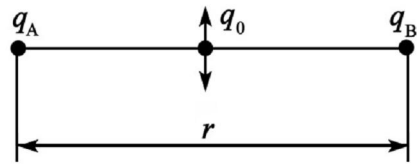



그림 1-24

(**답.** 1.152×10^{-14}N)

3. $y=3.5\sin\left(16\pi t+\frac{\pi}{4}\right)$ [cm]로 표시되는 진동그라프를 그리여라. 다음 진폭, 각진동수, $t=0$, $t'=3$s가 되는 순간의 자리각, $t_1=1$s, $t_2=4$s사이의 자리각변화 및 이 동안에 질점이 움직인 거리를 구하여라.

(**답.** 3.5cm, 16πrad/s, $\pi/4$, 48.25π, 48π, 3.36m)

4. 한 질점이 직선우에서 진폭 24mm, 진동주기 4s로 진동한다. $t=0$인 순간에 질점은 평형자리로부터 －방향의 12mm 되는 점에서 평형자리를 향하여 움직이고있다. 이 조화진동식을 쓰고 진동그라프를 그리여라.

(**답.** $y=24\sin(\frac{\pi}{2}t-\frac{\pi}{6})$ [mm])

5. 웃끝을 고정한 용수철에 질량이 m인 추를 매달고 F만 한 힘으로 A만큼 아래로 당겼다가 놓아주면 진동을 한다. 추가 평형자리로 돌아가는 시간과 평형자리를 지날 때의 속도를 구하여라.

(**답.** $\frac{\pi}{2}\sqrt{\frac{Am}{F}}$, $\sqrt{\frac{AF}{m}}$)

6. 질량이 m=0.2kg인 액체밀도계를 어떤 액체우에 띄웠다. 이것을 액체속에 잠그었다놓으면 T=3.4s의 주기로 떤다. 진동을 조화진동으로 보고 액체의 밀도를 구하여라. 이 액체밀도계의 직경은 D=1cm이다.

(**답.** 887kg/m^3)

7. 튐성결수가 k인 두 용수철을 직렬로 잇고 추 한개를 달았을 때와 두 용수철을 병렬로 잇고 같은 추를 달았을 때 용수철흔들이의 고유진동수는 용수철이 하나인 때의 몇배로 되겠는가?

(**답.** $1/\sqrt{2}$, $\sqrt{2}$)

8. 어떤 질점흔들이는 질량이 m_1이고 반경이 R_1인 별에서 주기가 T_1인 조화진동을 하고 질량이 m_2이고 반경이 R_2인 별에서는 주기가 T_2인 조화진동을 한다. T_1/T_2을 구하여라.

(**답.** $\sqrt{\dfrac{m_2 R_1^2}{m_1 R_2^2}}$)

9. 길이가 꼭같은 두줄에 두개의 구가 매달려있다. 첫째 구는 드림선을 따라 매단 점까지 올리고 둘째 구는 조화진동할수 있는 작은 각만큼 드림선으로부터 편기시켰다. 구들을 동시에 놓아주면 어느 구가 먼저 평형자리에 도달하겠는가?

(**답.** 첫째 구)

10. 튐성결수가 k_1=10N/m, k_2=15N/m인 두 용수철 A, B와 질량이 m=50g인 추 C가 있다.

ㄱ) 그림 1-25의 ㄱ와 같이 량끝을 고정한 용수철흔들이의 고유주기를 구하여라.

ㄴ) 그림 1-25의 ㄴ와 같이 드리운 용수철흔들이의 고유주기는 얼마인가?

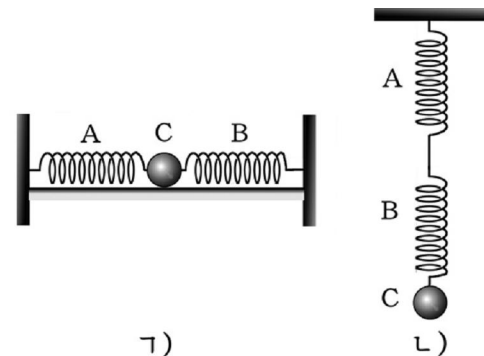



그림 1-25

(**답.** ㄱ) 0.28s ㄴ) 0.57s)

11. 추가 1s동안에 한번씩 떨 때 정확히 맞는 벽시계가 하루에 3min씩 떠진다. 추를 오르내리는 나사의 걸음이 0.25mm이라

면 이 나사를 몇바퀴 돌려야 시계가 맞겠는가?

(**답.** 약 4바퀴)

12. 우주운반로케트의 앞단에 진동주기가 꼭같은 질점흔들이와 용수철흔들이를 설치하였다. 발사가속도 g로 드림선방향으로 발사했을 때 다음의 문장에서 옳은것을 찾아라.

ㄱ) 주기는 다같이 2배로 되였다.

ㄴ) 주기는 다같이 변하지 않는다.

ㄷ) 질점흔들이의 주기는 변하지 않고 용수철흔들이의 주기는 2배로 되였다.

ㄹ) 용수철흔들이의 주기는 변하지 않고 질점흔들이의 주기는 $1/\sqrt{2}$배로 되였다.

13. 흔들이의 길이가 24.85cm인 흔들이를 승강기안에 설치하였다. 승강기가 $a_1=2.5\text{m/s}^2$, $a_2=g$의 가속도로 각각 아래로 내려올 때 흔들이주기는 얼마인가?

(**답.** 1.16s, 무한대)

14. 공기속에 설치한 질점흔들이는 공기의 저항때문에 멎고만다. 만일 이 흔들이를 진공속에 설치하면 어떻게 되겠는가? 왜 그런가?

15. 려객뻐스에 설치되여있는 손잡이가죽의 길이는 22cm이다. 뻐스가 달릴 때 차체의 진동주기가 0.05s라면 손잡이의 진폭이 최대로 되겠는가?

(**답.** 최대로 되지 않는다.)

16. 그림 1-26은 어떤 질점흔들이의 공진곡선이다.

ㄱ) 이 흔들이의 길이는 얼마인가?

ㄴ) 흔들이의 길이를 길게 하면 공진곡선의 마루가 어떻게 이동하겠는가?

(**답.** ㄱ) 2.76m ㄴ) 왼쪽)

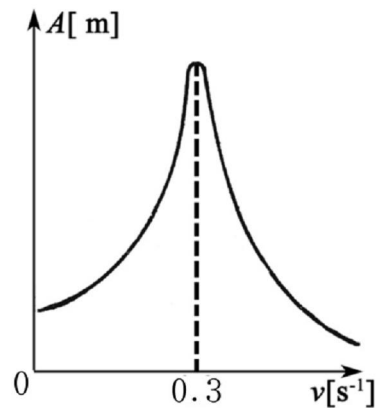



그림 1-26

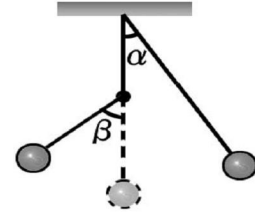
17. 길이가 $\ell=1\text{m}$인 흔들이를 드림선으로부터 $\alpha=30°$만큼 기울였다가 놓아준다. 평형자리를 지나는 순간 실의 중간이 못에 걸려 길이가 절반인 흔들이로 된다.(그림 1-27) 이 흔들이의 주

기와 최고높이에 이르렀을 때 드림선과 실사이의 각 β를 구하여라.

(답. 1.7s, 42.9°)

그림 1-27

18. m=5kg인 물체가 용수철과 부딪쳤다. 충돌전 속도가 v=2.5m/s, 용수철의 튐성결수가 k=85N/m라면 용수철이 얼마나 압축되였겠는가? 반대방향으로 튀여나올 때까지의 용수철과의 접촉시간은 얼마인가?

(답. 0.6m, 0.76s)

복습문제(2)

1. 어떤 학생이 큰 글자로 씌여진 책을 손에 쥐고 앞뒤로 흔든다. 책이 어느곳에 있을 때 옆의 학생이 글자를 잘 알아볼수 있는가? 왜 그런가?

2. 그림 1-28과 같이 두개의 경사면을 따라 아래우로 굴러오르내리는 작은 구의 진동주기를 구하여라. 운동할 때 마찰과 속도의 손실을 무시한다.

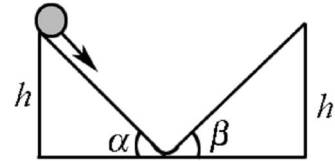



그림 1-28

(답. $2\sqrt{\frac{2h}{g}}\left(\frac{1}{\sin\alpha}+\frac{1}{\sin\beta}\right)$)

3. 질점이 조화진동을 한다. 어떤 순간의 변위가 5cm이다. 자리각이 2배로 커지면 질점의 변위는 8cm로 된다. 진폭을 구하여라.

(답. 8.3cm)

4. 용수철흔들이에서 처음에 평형자리에 있다가 진폭의 절반을 지나는데 걸리는 시간은 주기의 몇분의 일인가? 또 처음에 끝점에 있다가 진폭의 1/3을 지나는데 걸리는 시간은 주기의 몇분의 일인가?

(답. T/12, T/7.5)

5. 그림 1-29와 같은 장치에서 물체 M은 축을 따라 마찰없이 움직일수 있다. 두 용수철이 꼭같이 튐성결수가 k이라면 이 장치를 ω의 각속도로 돌려 질량이 m인 물체 M을 진동시킬 때 진동주기를

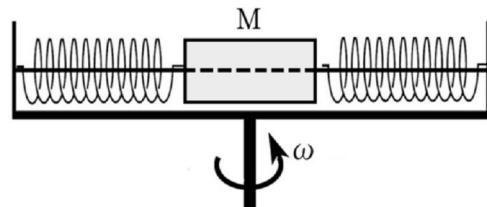



그림 1-29

구하여라.

(답. $\frac{2\pi}{\sqrt{2k/m-\omega^2}}$)

6. 용수철에 질량이 0.1kg인 접시가 매달려 진폭 0.1m로 드림선우에서 조화진동을 한다. 접시가 제일 아래점에 내려왔을 때 질량이 0.01kg인 짐을 놓았더니 진동이 멎었다. 접시의 처음 진동주기를 구하여라.

(답. 약 2.1s)

7. 한 흔들이는 어떤 시간동안에 10번 진동하고 다른 흔들이는 같은 시간동안에 6번 진동하였다. 두 흔들이의 줄의 길이차는 16cm이다. 두 흔들이의 길이를 각각 구하여라.

(답. 9cm, 25cm)

8. 길이가 각각 1m, 0.5m인 두 흔들이의 추가 평형자리에서 맞닿아있도록 실의 웃끝을 고정하고 한 흔들이를 옆으로 기울였다가 놓아주면 추들이 서로 충돌하였다가 튀여난다. 1min동안에 몇번 충돌하겠는가? 추들의 질량은 같고 튐성충돌을 한다.

(답. 약 70번)

9. 직경이 10mm인 유리관속에 물을 조금 넣고 물우에 띄워놓은 다음 약간 눌렀다가 놓으면 아래우로 진동한다. 진동주기를 구하여라. 물이 든 유리관의 질량은 1.9g이다.

(답. 0.312s)

10. U자모양의 관속에 120g의 수은이 들어있다. 이 관을 기울였다가 바로세우면 수은이 관속에서 조화진동을 한다. 이 진동주기를 구하여라. U자관의 자름면적은 $0.3cm^2$이며 수은의 밀도는 $13\ 600kg/m^3$이다.

(답. 0.77s)

11. 떠는 물체에 되돌이힘외에 또 다른 힘이 작용하는 경우 그 물체는 늘 감쇠진동을 하는가?

제2장. 력학적파동

파동은 자연과 우리 생활에서 매우 중요한 자리를 차지하는 물리적현상이다.

물결파, 소리파, 지진파, 전자기파, 빛파동과 같은 파동현상은 그것이 일어나는 원인과 물리적본성은 각이하지만 파동으로서의 공통성을 가지고 우리 둘레에서 다양하게 일어난다.

이 장에서는 력학적파동의 공통적인 성질들에 대하여 학습하게 된다.

제1절. 파동과 그것을 특징짓는 량

파 동

호수나 저수지에 작은 돌을 던지면 돌이 떨어진 자리에서는 물면이 아래우로 오르내리면서 진동한다. 물면에 생긴 이 진동은 원을 그리면서 사방으로 퍼져나간다.(그림 2-1)

이처럼 어떤 자리에 생긴 진동이 다른 자리로 퍼져나가는 현상을 **파동**이라고 부른다. 파동을 전달하는 물질을 **파동의 매질** 간단히 **매질**이라고 부르며 파동이 생긴 자리를 **파원**이라고 부른다. 물면에 생긴 파동실례에서 물은 파동의 매질이고 물면에 돌이 떨어진 자리는 파원이다.

그림 2-1. 물면에 생긴 파동

물면을 따라 파동이 전파될 때 물우에 떠있는 나무잎은 파동의 전파방향으로 이동해가지 않고 아래우로만 진동한다.

이것을 통하여 파동이 퍼질 때에는 매질알갱이들은 이동하지 않고 그 자리에서 진동만 하고 퍼져나가는것은 진동모양뿐이라는것을 알수 있다.

파동은 진동이 퍼져나가는것이므로 진동하는 매질알갱이들은 진동에네르기를 다음 알갱이에 넘겨준다. 즉 파동은 에네르기를 전

달하는 한가지 방식이다.

가로파와 세로파

❓ 매질알갱이의 진동방향과 진동이 퍼져나가는 방향사이에는 어떤 관계가 있는가.

그림 2-2와 같이 고정된 줄의 한끝을 아래우로 또는 좌우로 진동하면 그에 수직인 방향으로 줄을 따라 파동이 퍼져나간다. 이처럼 매질알갱이의 진동방향에 수직으로 전파하는 파동을 **가로파**라고 부른다.

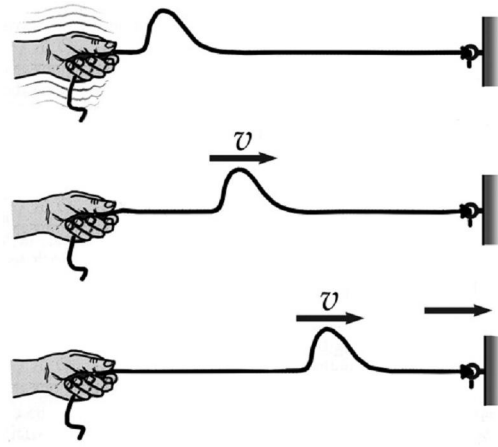



그림 2-2. 가로파

가로파는 액체걸면이나 고체를 통하여 전파한다. 줄을 따라 전파하는 파동은 가로파이다.

그림 2-3과 같이 고정된 용수철의 한끝이 용수철을 늘인 방향으로 진동하면 그 방향으로 파동이 퍼져나간다. 이와 같이 매질알갱이들의 진동방향과 같은 방향으로 전파하는 파동을 **세로파**라고 부른다. 세로파가 전파할 때 매질알갱이들이 배게 분포된 자리와 성글게 분포된 자리들이 교대로 생기며 이것들이 전파방향으로 이동한다.

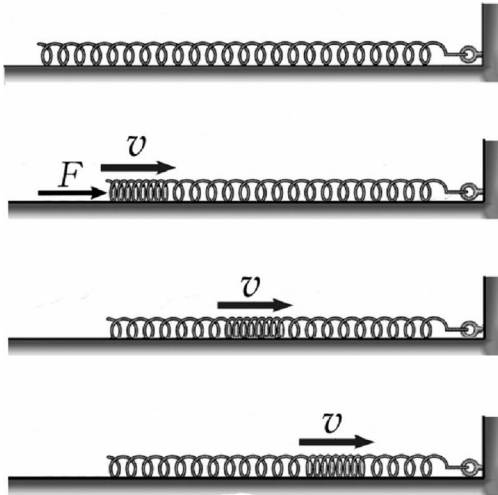



그림 2-3. 세로파

소리는 세로파의 대표적인 실례이다.

세로파는 고체, 액체, 기체와 같이 튐성을 가진 모든 매질에서 전파한다.

파동을 특징짓는 량

파동은 진동이 전파되여나가는것이므로 진동을 특징짓는 량들인 진폭, 진동수, 진동주기, 각진동수가 파동을 특징짓는 량으로도 된다.

이밖에 파장, 파동의 전파속도가 있다.

같은자리각으로 진동하는 이웃한 두 점사이의 거리는 바로 한주기동안에 파동이 퍼져나가는 거리와 같은데 이것을 **파장**이라고 부른다.(그림 2-4)

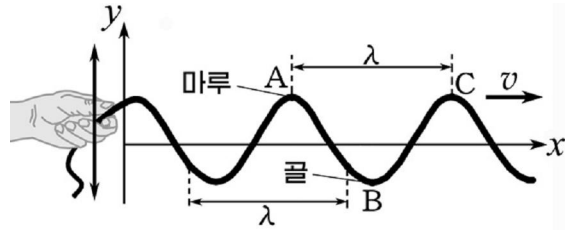



그림 2-4. 파 장

가로파에서는 마루와 마루(골과 골)사이, 세로파에서는 밴 곳과 밴 곳(성긴 곳과 성긴 곳)사이의 거리가 파장으로 된다.

파동의 모양이 이동해가는 속도를 **파동의 전파속도**라고 부른다.

파동의 전파속도는 단위시간동안에 파동이 퍼져나간 거리와 같은 값을 가진다.

파동이 한주기동안에 파장 λ만큼 전파되므로 파동의 전파속도는 다음과 같이 표시된다.

$$v = \frac{\lambda}{T} = \nu\lambda \qquad \text{파동의 전파속도}$$

파동의 전파속도는 매질에 따라 다르다.

문제

1. 력학적진동과 력학적파동에 대한 아래의 설명에서 정확한것을 선택하고 그 근거를 밝혀보아라.

ㄱ) 력학적진동이 있으면 반드시 력학적파동이 있다.

ㄴ) 력학적파동이 있으면 반드시 력학적진동이 있다.

ㄷ) 파동의 진동수는 이 파동에서 매 질점의 진동수와 같다.

ㄹ) 파동의 전파속도는 이 파동에서 진동하는 질점의 속도와 같다.

2. 그림 2-5에서 가로파가 바줄을 따라 오른쪽으로 전파되여 파동을 이룬다. 이 바줄의 6개 질점에 대하여 다음과 같이 설명하였다. 어느것이 옳은가?

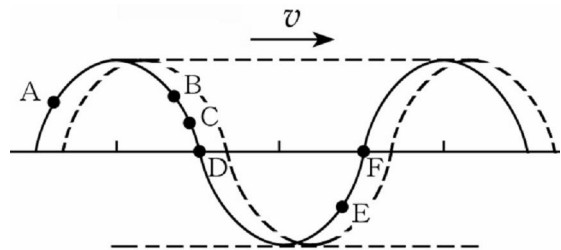



그림 2-5

ㄱ) 그것들의 진폭은 다 같다.

ㄴ) 질점 D와 F의 속도방향은 같다.

ㄷ) 질점 A와 D의 속도방향은 같다.

ㄹ) 질점 B는 C보다 먼저 평형자리에 이른다.

3. 바다에서 파동의 마루와 마루사이의 거리가 8m이고 바다물에 떠있는 나무토막이 1min동안에 24번 오르내린다면 파동의 전파속도는 얼마인가?

4. 물이나 공기속에서는 가로파가 퍼질수 없다. 왜 그런가?

물 면 파

물면파는 가로파가 아니다.(그림 2-6) 파동의 전파과정에 대한 표상을 쉽게 주기때문에 많은 경우 물면파를 실례로 설명한다.

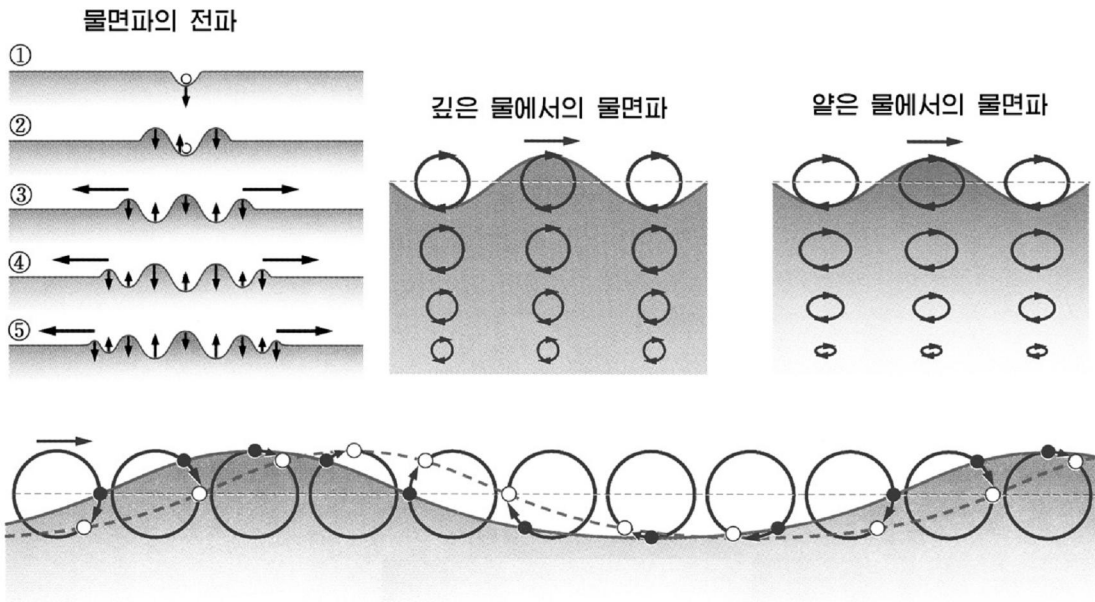



그림 2-6. 물 면 파

제2절. 파동의 식

조화파동의 식

진동가운데서 가장 간단한것이 조화진동이므로 조화진동이 퍼져나가는 파동이 가장 간단한 파동으로 된다. 조화진동이 퍼져나가는 파동을 **조화파동**이라고 부른다.

조화진동하는 파원으로부터 x축방향으로 전파하는 조화파동을 나타내는 식을 구하자.

파원이 진폭 A, 진동수 ν, 주기 T로 처음자리각이 0인 조화진동을 한다면 진동하는 점의 변위 y는 다음과 같이 표시할수 있다.

$$y_0 = A\sin\omega t = A\sin 2\pi\nu t = A\sin\frac{2\pi}{T}t \qquad (1)$$

여기서 t는 파원이 원점 O에서 진동을 시작한 시각부터 지나간 시간이다. 그러므로 파원에 원점을 정하고 x축방향으로 v의 속도로 퍼져나가는 조화파동의 식을 구하면 된다.(그림 2-7)

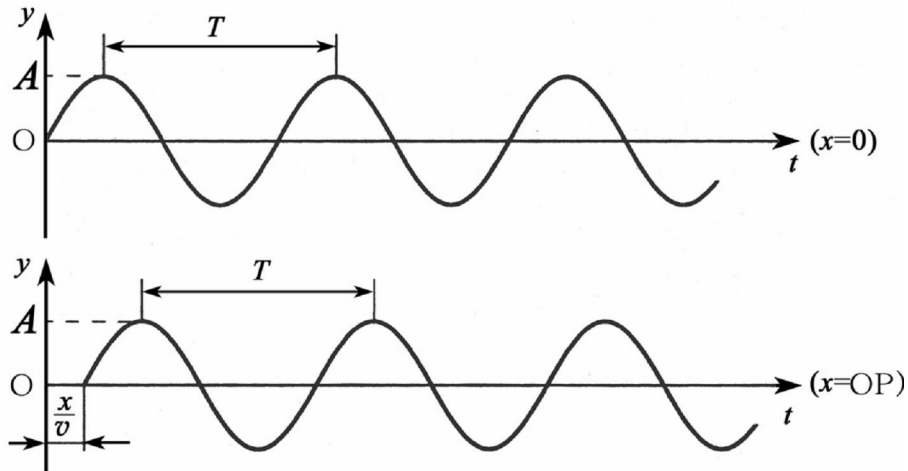



그림 2-7. 파원으로부터 x=OP만큼 떨어진 점에서의 파동의 시작

파동이 파원으로부터 OP=x만큼 퍼져나가는데는 x/v만 한 시간이 걸리므로 P점은 파원보다 이만큼 늦어 떨게 된다. 그러므로 임의의 t시각까지 파원이 t만 한 시간 떤다면 P점은 이 시각까지 $(t-x/v)$만 한 시간 떤다.

따라서 P점에서의 변위는 x/v시간전의 O점에서의 변위와 같고 t시각에 P점에서의 변위는 식 1에서 t를 $(t-x/v)$로 바꾼것으로 표시된다. 그러면 x축방향으로 퍼지는 조화파동의 식은 다음과 같다.

$$y = A\sin\omega\left(t - \frac{x}{v}\right) = A\sin 2\pi\left(\frac{t}{T} - \frac{x}{\lambda}\right) \quad \text{조화파동식} \qquad (2)$$

파동의 그라프

파동의 식에는 두 변수 x와 t가 들어있다. 즉 파동이 퍼질 때 매질알갱이들의 변위는 시간과 자리에 따라 주기적으로 변한다.(그림 2-8)

그림 2-8. 파동의 그라프

x가 주어지면 파동의 식은 주어진 점 즉 파원으로부터 x만큼 떨어진 점의 진동식을 표시한다.

t가 주어지면 파동의 식은 그 시각에 파원으로부터의 거리 x에 따라 매질알갱이들의 변위 y가 어떻게 변하는가 하는 **파모양**을 표시한다.

파장이 λ인 파동이 x축방향으로 퍼져나간다고 하자.

그림 2-9에서 실선은 $t=0$인 시각에 매질의 매개 점들의 변위를 표시하는 파동의 그라프이며 점선은 매우 짧은 Δt 시간후의 파동의 그라프이다.

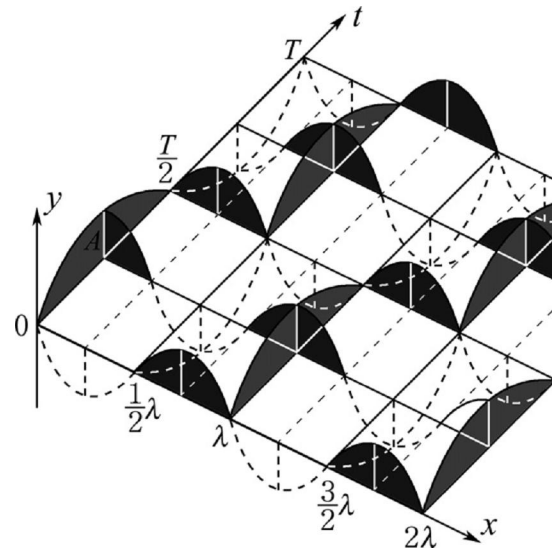
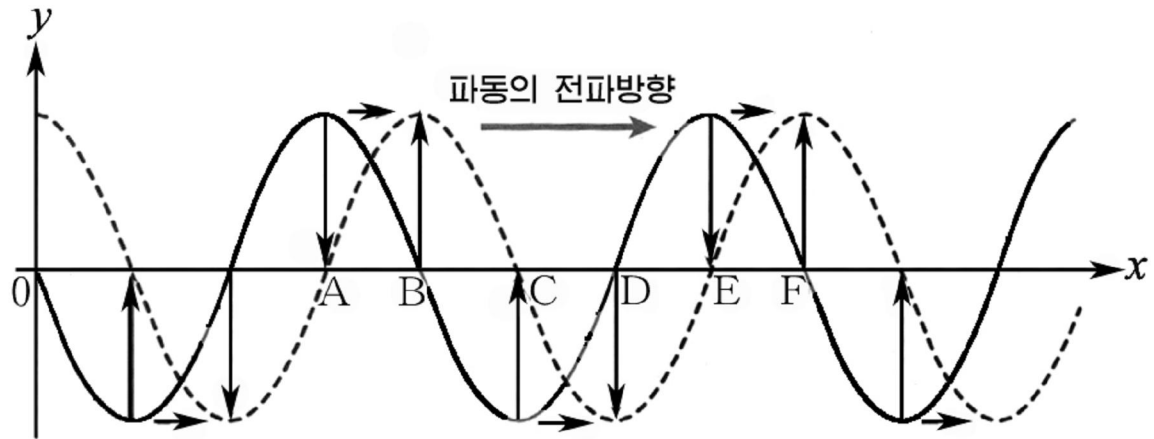



그림 2-9. 파모양의 이동

두 그라프를 대응시켜 Δt 시간사이의 매개 점의 변위의 크기

와 방향을 화살로 나타내면 매질의 매개 점이 진동하여 변위한 결과 그라프는 조금 이동하였다. 즉 x축우에 놓인 매질의 매개 점들의 아래우 진동에 대하여 파모양은 전체적으로 오른쪽으로 이동하였다.

파동의 자리각과 자리각차

진동에서 물체의 자리를 자리각으로 표시한것처럼 파동이 퍼지는 공간의 매 점의 자리(평형자리로부터의 변위)를 표시하는데도 자리각을 쓴다.

파동의 식의 시누스함수안에 있는 각으로 표시된 량을 **파동의 자리각**이라고 부른다. 자리각은 파동이 퍼지는 공간의 매 점의 진동상태(자리)를 특징짓는 량이다.

한 방향으로 퍼져나가는 조화파동에서 파원의 처음자리각이 0일 때 파원으로부터 x만큼 떨어진 점 P에서 t시각의 자리각은 다음과 같다.

$$\varphi(x,\ t)=\omega\left(t-\frac{x}{v}\right)=2\pi\left(\frac{t}{T}-\frac{x}{\lambda}\right) \quad \text{파동의 자리각} \qquad (3)$$

파동의 자리각은 파원으로부터의 거리 x와 시간 t에 관계된다.

파원에서의 자리각은 $x=0$이므로

$$\varphi(x,\ t)=2\pi\frac{t}{T}=2\pi\nu t$$

이다. 주어진 시각에 파원으로부터 x만큼 떨어진 점과 $x+\Delta x$ 만큼 떨어진 점사이의 자리각차는 다음과 같다.

$$\Delta\varphi=\varphi(x,\ t)-\varphi(x+\Delta x,\ t)=2\pi\frac{\Delta x}{\lambda} \quad \text{파동의 자리각차} \qquad (4)$$

그림 2-10에서 같은 기호로 표시된 점들은 같은자리각으로 진동하는 점들이며 ○와 ●, △와 ▲, ◎와 ◉, □와 ■점들은 반대자리각으로 진동하는 점들이다. 자리각이 같은 가장 가까이 있는 두 점사이의 거리는 파장 λ와 같다.

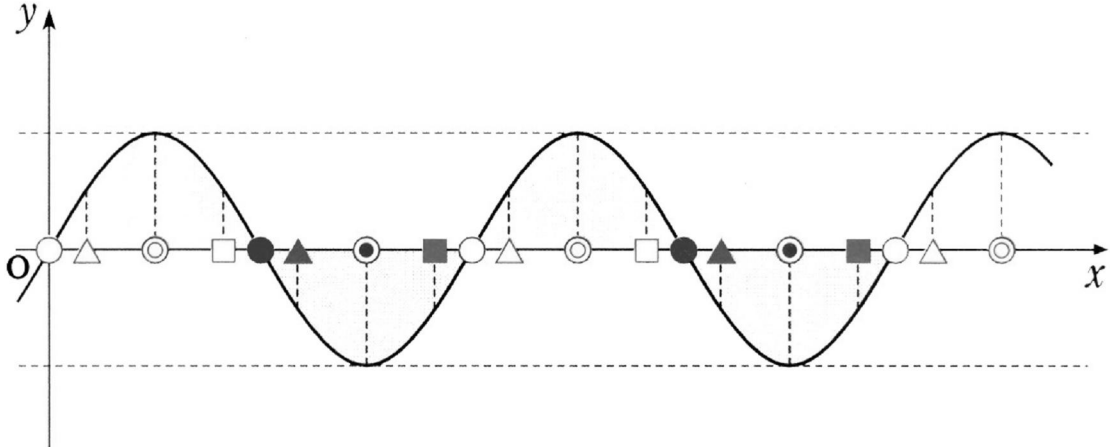



그림 2-10. 같은자리각으로 진동하는 점들과 반대자리각으로 진동하는 점들

문제

1. $y=0.05\sin 4\pi\left(t-\frac{x}{10}\right)$로 표시되는 파동의 주기, 진동수, 파장 및 전파속도를 구하여라. 그리고 $t=0.5$s인 때의 파모양, $x=0.5$m 인 점에서의 진동식을 구하고 그라프를 그리여라.
2. 진폭이 3cm, 진동수가 5Hz, 전파속도가 1m/s인 파동이 x축 방향으로 전파된다. 파동식을 쓰고 $t_1=T$와 $t_2=2.5T$일 때의 파모양을 그라프로 그리여라.
3. 진동수가 60Hz인 물면파가 0.1m/s의 속도로 퍼질 때 어떤 한 점을 거쳐 1s동안에 몇개씩의 마루와 골이 지나가겠는가?
4. 다음의 빈칸에 x축방향으로 퍼지는 파동에서 반대자리각으로 진동하는 점들과 같은자리각으로 진동하는 점들사이의 시간차, 거리차, 자리각차를 써넣어라.

	반대자리각으로 진동	같은자리각으로 진동
시간차 Δt		
거리차 Δx		
자리각차 $\Delta\varphi$		

제3절. 파동의 간섭

파동의 중첩

강과 호수에서는 수많은 물결이 퍼지면서 겹치여 여러가지 모양의 물결을 이룬다.

공간에서 여러개의 파동들이 전파되면서 겹칠 때 서로 어떤 영향을 미치는가를 알아보자.

그림 2-11의 ㄱ는 파동보이기실험기구의 두끝을 흔들어놓았을 때 변위방향이 같은 두 파동이 서로 마주 향하여 전파되면서 겹치는 과정을 보여준다. 두 파동이 겹치면 합성파모양이 그림 2-11의 ㄴ에서와 같이 되였다가 다시 갈라져서 전파된다.

여기서 두 파동이 서로 만났다가 갈라지면 만나기 전과 꼭같은 파모양을 다시 유지하면서 계속 전파되는것을 알수 있다.

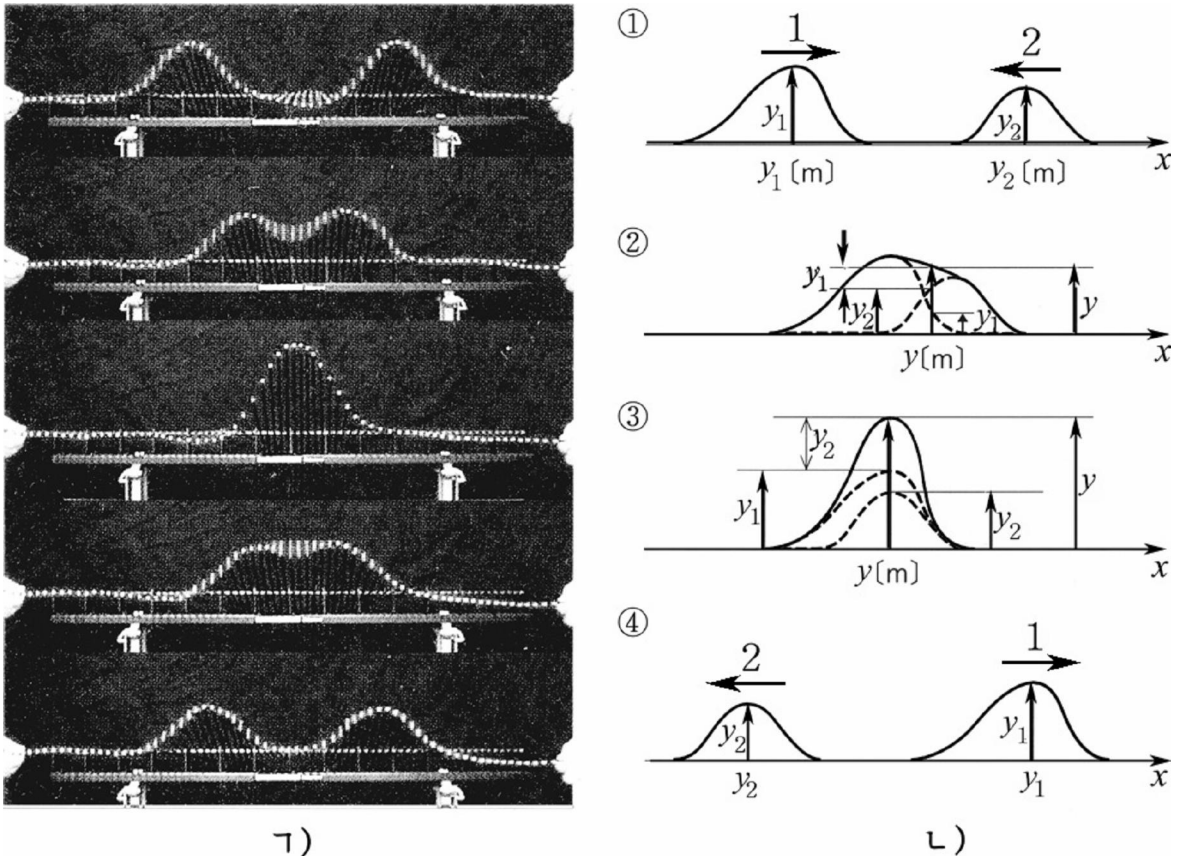



그림 2-11. 파동의 중첩

이처럼 같은 매질속으로 전파되는 파동들이 중첩될 때 서로 아무런 영향을 미치지 않으면서 매개 파모양이 유지되는 파동의 성질

을 **파동의 독립성**이라고 부른다.

파동의 독립성으로 하여 다음과 같은 결론이 나온다.

파동들이 겹친 곳에서 변위는 매 파동에 의한 변위들의 벡토르합과 같다. 이것을 **파동의 중첩원리**라고 부른다.

$$y = y_1 + y_2 \quad \text{파동의 중첩원리} \qquad (1)$$

파동의 간섭

물면에서 퍼져나가는 파동은 눈으로 볼수 있기때문에 파동의 성질을 연구하는데 아주 편리하다.

이제 두 점파원으로부터 진동수와 진동방향이 각각 서로 같은 두 파동이 전파되여 중첩되는 경우를 실험으로 알아보자.

실험

○ 물면파실험기구의 물그릇에 물을 붓고 물면우의 두 점을 같은자리각으로 진동하게 한다.(그림 2-12)

○ 두 파동이 중첩되는 부분을 살펴본다. 두 점파원에서 퍼져나온 파들이 중첩되는 구역을 보면 세게 떠는 점들과 거의 떨지 않는 점들이 있고 이것들이 이룬 선들이 엇바뀌여 배치된 무늬를 볼수 있다.(그림 2-13)

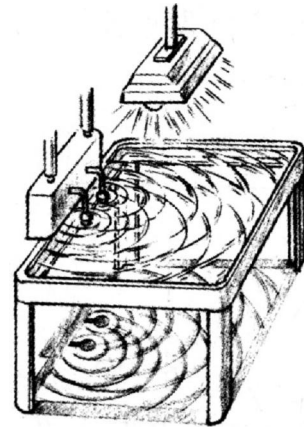



그림 2-12. 물면파실험기구

그림 2-13. 물면파의 간섭무늬

이와 같이 진동수와 진동방향이 같은 두개 또는 그 이상의 파동들이 중첩될 때 세게 진동하는 자리와 약하게 진동하는 자리가 고정되여 나타나는 현상을 **파동의 간섭**이라고 부른다.

파동의 간섭이 일어날 때 합성진동이 가장 세게 일어나는것을 간섭의 **극대**, 가장 약하게 일어나는것을 간섭의 **극소**라고 부르며 극대, 극소분포를 보여주는 무늬를 **간섭무늬**라고 부른다.

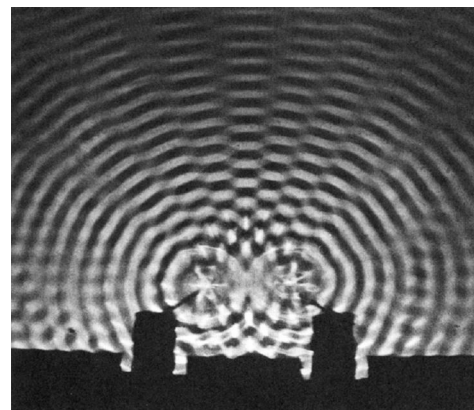



그림 2-14에서 마루와 마루(실선과 실선) 또는 골과 골(점선과 점선)이 겹친 곳에서는 두 파동에 의한 진동이 같은자리각(자리각차 $\Delta\varphi = 2k\pi$) 으로 일어나므로 합성진동이 가장 세고 진폭은 $A = A_1 + A_2$로서 극대가 된다.

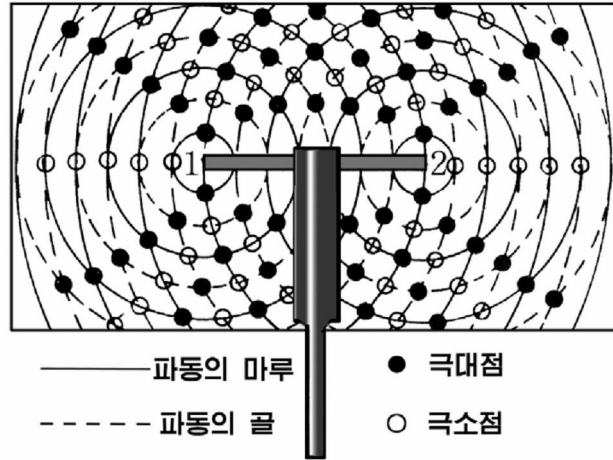



그림 2-14. 간섭의 극대와 극소

마루와 골(실선과 점선)이 겹친 곳에서는 반대자리각(자리각차 $\Delta\varphi = (2k+1)\pi$)을 가진 진동들이 합성되므로 합성진동이 가장 약하고 진폭은 $A = |A_1 - A_2|$ 로서 극소가 된다.

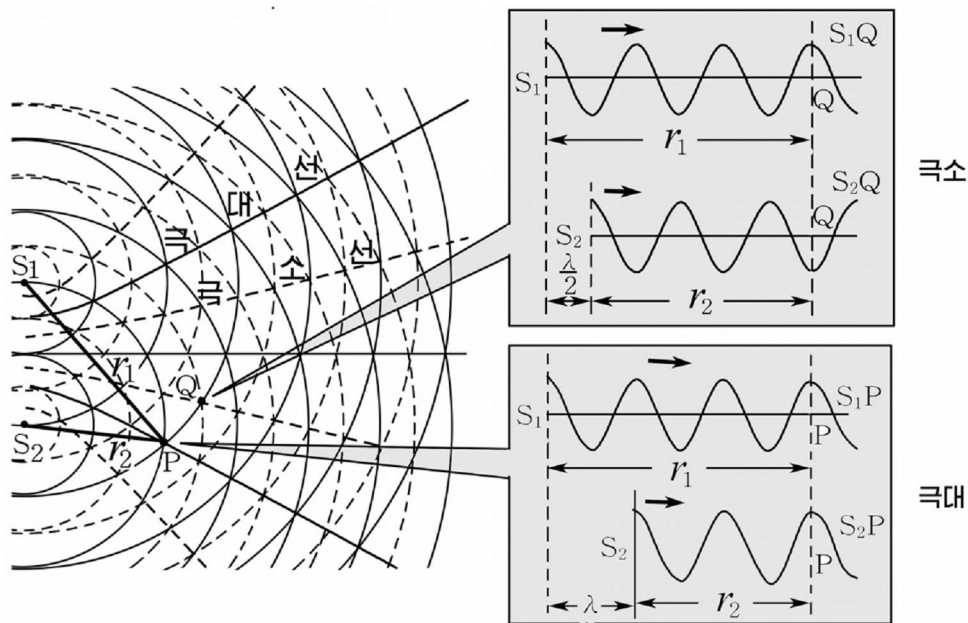



그림 2-15. 간섭의 극대와 극소

그림 2-15에서 두 파원 S_1과 S_2로부터 고찰점까지의 거리 r_1과 r_2의 차 Δr 가 파장의 옹근수배이면 그 점(P)은 극대자리가 되고 반파장의 홀수배이면 그 점(Q)은 극소자리가 된다.

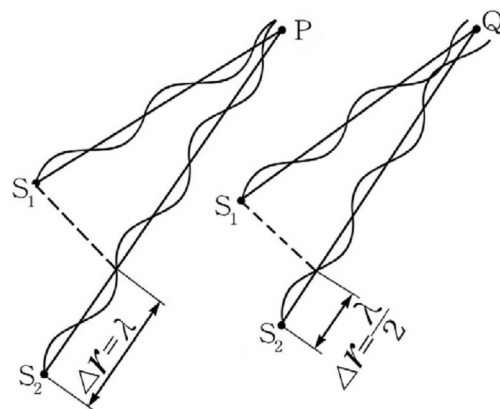



그림 2-16. 거리차에 따르는 극대와 극소

여기서 Δr 는 두 파원으

로부터 고찰점까지의 거리차이다.(그림 2-16)

$\Delta r = k\lambda$	간섭의 극대	
$\Delta r = (2k+1)\dfrac{\lambda}{2}$	간섭의 극소	(2)
$(k = 0,\ \pm 1,\ \pm 2, \cdots)$		

간섭조건

간섭무늬가 생기자면 합성진동이 센 자리는 계속 세게 진동하고 합성진동이 약한 자리는 계속 약하게 진동해야 한다.

한 점에서의 합성진동이 세졌다약해졌다하면서 극대로 되였다가 극소로 되면 간섭무늬가 생길수 없다.

즉 합성진동이 극대로 되는 자리들과 극소로 되는 자리들이 고정되여야 간섭무늬가 생기는데 그렇게 되자면 파동이 중첩되는 공간의 매 점에서 두 파동에 의한 진동의 자리각차가 일정해야 한다.

따라서 간섭이 일어나기 위한 구체적인 조건은 다음과 같다.

첫째로, 두 파동의 진동수(각진동수)가 같아야 한다.

둘째로, 두 파동의 처음자리각차가 일정해야 한다.

이 두 조건이 동시에 만족되여야만 겹치는 파동들의 자리각차가 시간에 따라 변하지 않는다. 이 조건을 만족시키는 파원을 **간섭성파원**이라고 부른다.

[례제] 같은자리각으로 진동하는 두 파원에서 어떤 점 P까지의 거리가 각각 45cm, 60cm이다. 파동의 파장이 30cm라면 간섭결과 점 P는 어떤 진폭으로 진동하겠는가? 두 파동의 진폭은 같다.

풀이. 주어진것: $r_1 = 45\text{cm}$

$r_2 = 60\text{cm}$

$\lambda = 30\text{cm}$

구하는것: A?

$$\Delta r = r_2 - r_1 = 60 - 45 = 15\ (\text{cm})$$

조건으로부터 $\Delta r = \dfrac{\lambda}{2}$ 이므로 극소조건에 맞는다.

답. 0

문제

1. 두 파원의 진동수가 다르거나 그것들이 제가끔 떨었다멎었다한다면 간섭무늬가 생기겠는가?
2. 같은자리각으로 진동하는 두 점파원으로부터 거리차가 2cm인 자리는 간섭의 극대자리이고 이 자리에서 가장 가까운 극소자리까지의 거리차는 1cm이다. 간섭하는 파동들의 파장은 얼마인가?
3. 두 파원이 반대자리각으로 진동한다면 극대와 극소조건이 어떻게 변하겠는가?
4. 파동의 간섭에 대하여 다음과 같이 설명하였다. 옳은것을 선택하고 그 근거를 밝히여라.
   ㄱ) 간섭무늬는 두 파원의 진동수가 반드시 같아야 이루어진다.
   ㄴ) 간섭무늬는 두 파원이 반드시 같은자리각으로 진동할 때에만 이루어진다.
   ㄷ) 간섭무늬는 두 파원이 반대자리각으로 진동할 때에도 이루어질수 있다.
   ㄹ) 진동수와 진동방향이 같은 두 파원은 반드시 간섭성파원이다.

제4절. 정상파

정상파

? 한끝이 고정된 줄의 다른 끝을 흔들어 줄을 따라 전파되던 파동이 고정된 끝에서 반대방향으로 전파되게 하여 겹치면 어떻게 되겠는가.

실험

○ 바줄의 한끝을 고정하고 다른 끝을 옆으로 흔든다. 줄을 따라 가는 파동과 오는 파동이 중첩된다.

○ 줄끝을 천천히 흔들다가 점점 빨리 흔들어 진동수를 높여가면서 관찰한다. 어떤 진동수에 이르면 세게 떠는 자리와 전혀 떨지 않는 부분들이 생겨나는데 진동수를 더 크게 하면 이러한 자리들이 더 많이 생겨난다.(그림 2-17)

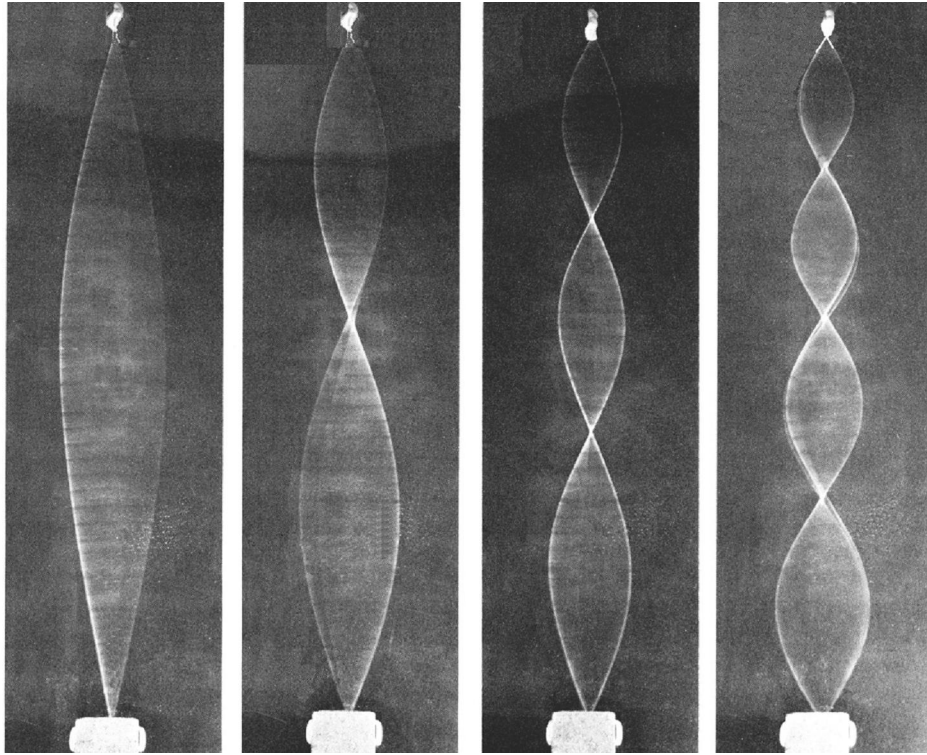



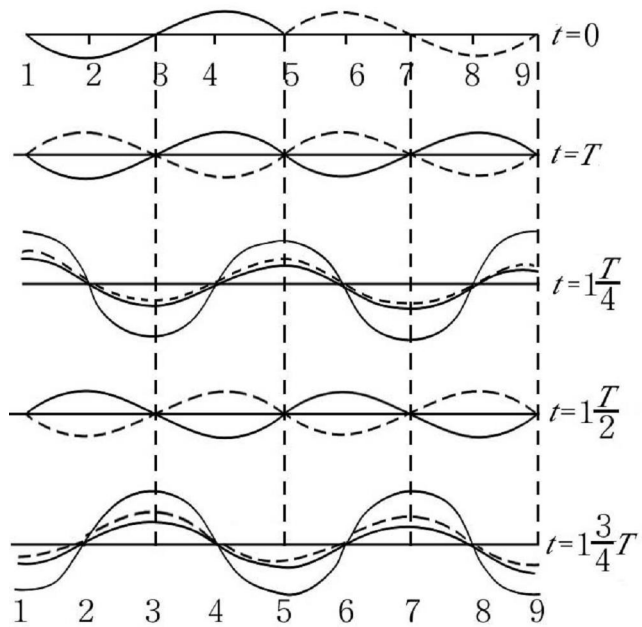
그림 2-17. 줄에서의 정상파

세게 떠는 자리를 **배**, 떨지 않는 자리를 **마디**라고 부른다.

줄에 생긴 마디와 배들은 어느쪽으로도 이동하지 않는다. 이런 현상은 줄을 따라 한쪽으로 퍼져나가는 파동과 그것이 반사되여 되돌아오는 파동이 중첩된 결과에 생긴다.

이처럼 진동수와 진폭이 같은 두 파동이 마주 퍼질 때 이것들이 중첩된 결과에 배와 마디가 번갈아 나타나 멎어있는것처럼 보이는 파동을 **정상파**라고 부른다.

그림 2-18. 정상파가 이루어지는 과정

파장, 진폭 및 전파속도가 각각 서로 같은 두 파동이 그림 2-18에서와 같이 마주 향해 오다가 $t=0$인 순간에 점 5에서 만났다고 하자.

파동은 한주기 T사이에 한 파장 λ만큼 옮겨가므로 그다음 주기의 $\frac{T}{4}$사이에는 $\frac{\lambda}{4}$만큼, $\frac{T}{2}$사이에는 $\frac{\lambda}{2}$만큼, $\frac{3}{4}T$사이에는 $\frac{3}{4}\lambda$만큼 옮겨간다.

이런 과정을 거쳐 점 1, 3, 5, 7, 9에서는 두 파동이 언제나 같은자리각으로 중첩되여 제일 세게 진동하는 배들이 생기고 점 2, 4, 6, 8에서는 언제나 두 파동이 반대자리각으로 중첩되여 진동하지 않는 마디들이 생긴다. 정상파는 바로 이렇게 되여 이루어진다.

정상파는 자기의 고유한 형태로 하여 앞에서 본 일반적인 조화파동과 다른 특징을 가진다.

첫째로, 파동의 모양과 에네르기가 전파되여나가지 않는다.

둘째로, 진폭이 최대인 배와 최소인 마디가 고정되여있으며 배와 마디사이에서는 자리에 따라 진폭이 다르다.

셋째로, 이웃한 두 마디사이의 점들은 같은자리각으로 진동하며 마디량쪽의 점들은 반대자리각으로 진동한다.

두끝이 고정된 줄에서 정상파

두끝이 고정된 줄의 길이(ℓ)와 파장(λ)사이에 어떤 관계가 있겠는가.(그림 2-19)

배가 하나 생겼을 때 $\ell=\lambda_1/2$

배가 2개 생겼을 때 $\ell=2(\lambda_2/2)$

배가 n개 생겼을 때 $\ell=n(\lambda_n/2)$

따라서 이때 정상파의 파장은 다음과 같이 표시된다.

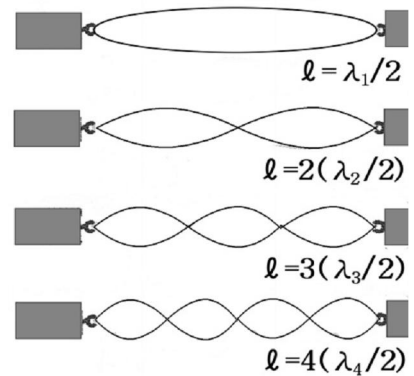



그림 2-19. 두끝이 고정된 줄에서 정상파

$$\lambda_n=\frac{2\ell}{n}$$ 두끝이 고정된 줄에 생기는 정상파의 파장

(n=1, 2, 3, …)

배가 하나만 생기는 고유진동(n=1)을 **기본진동**이라고 부르며 배가 여러개 생기는 고유진동(n=2, 3,…)을 **배진동**이라고 부른다.

반파장손실

매질의 경계에서 반사하는 파동은 자리각의 변화가 생길수 있다.

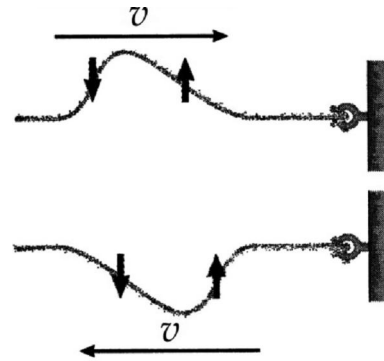
고정된 끝에 마디가 있다는것은 입사파와 반사파의 자리각이 정반대라는것을 보여준다.(그림 2-20)

공기속에서 전파되던 파동이 고체나 액체겉면에서 반사되는 때를 실례로 들수 있다.

일반적으로 파동이 성긴 매질에서 밴 매질로 들어가는 경계에서 반사할 때에는 자리각이 π 만큼 변한다. 이것은 입사파가 $\lambda/2$만큼 잘리우고 반사파로 되는것과 같다.

그림 2-20. 반사파는 변위방향이 바뀐다

이처럼 반사할 때 자리각이 π 만큼 변하는것을 **반파장손실**이라고 부른다.

파동이 보다 더 성긴 매질로 들어가는 경계에서 반사할 때에는 반파장손실이 없다.

한끝은 고정되고 다른 끝은 자유로운 금속띠가 떨 때 고정끝에는 마디, 자유끝에는 배가 있게 된다. 띠의 길이가 ℓ이고 띠에서의 파동의 전파속도가 v라면 띠의 고유진동수는 얼마인가?

문제

1. 진폭이 2cm이고 파장이 20cm인 두 파동이 겹쳐 정상파를 이루었다. 배와 배사이의 거리, 배에서의 진폭은 얼마인가?
2. 8.5cm 떨어져있는 두 점파원이 같은자리각으로 떨면서 물결을 일군다. 진동수가 20Hz이고 물결이 퍼지는 속도가 0.2m/s일 때 두 점파원사이에 이루어진 정상파에는 몇개의 마디와 배가 있겠는가?
3. 정상파에 대하여 다음과 같이 설명하였다. 옳은것을 선택하고 그 근거를 밝히여라.

   ㄱ) 정상파는 파동의 간섭의 특수경우이다.

   ㄴ) 정상파의 마디는 두 파동의 변위가 0인 점들이 합성된 자리들이다.

   ㄷ) 정상파에서 진폭이 최대인 자리는 반드시 배로 된다.

   ㄹ) 파동이 서로 다른 매질의 경계에서 반사할 때 반드시 반파장손실이 일어난다.

제5절. 파동의 에돌이

파 면

우리는 이미 전기마당속에서 전위가 같은 점들로 이루어지는 면이 등전위면이라는것을 알고있다.

그렇다면 파면은 어떤 면인가.

한 점에서 일어난 물결은 동그라미를 그리면서 퍼져나간다. 이때 파원에 중심을 둔 한 원둘레우의 점들은 언제나 같은 진동상태에 있다. 다시말하여 마루가 될 때에는 다같이 마루가 되고 골이 될 때에는 다같이 골이 된다. 즉 같은자리각으로 진동한다. 공간에서 퍼지는 파동에서도 자리각이 같은 점들을 찾을수 있다.

이 점들을 이어놓으면 어떤 면을 이룬다.

파동이 퍼질 때 자리각이 같은 점들이 이루는 면을 **파면**이라고 부른다. 파면을 **같은자리각면**이라고도 부른다.

그림 2-21. 파면과 파선

파면들이 구면인 파동을 **구면파**, 파면들이 평면인 파동을 **평면파**라고 부른다.(그림 2-21)

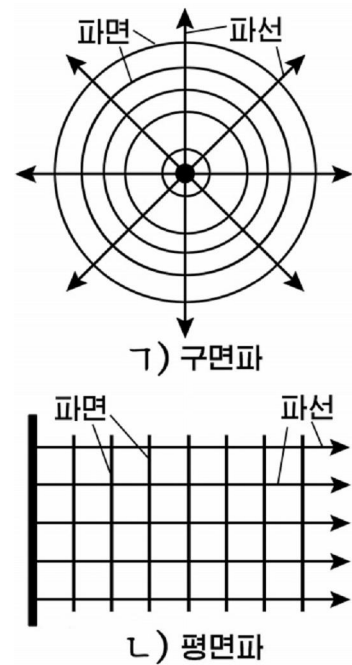
일반적으로 점파원에서 나오는 파동은 구면파를 이룬다.

그러나 매우 먼거리에서는 제한된 범위안에서 파면이 평면에 가까우므로 평면파로 볼수 있다. 파동이 퍼져나가는 과정을 파면이 전진하는것으로 볼수 있다. 파동이 퍼져나가는 방향으로 그은 선을 **파선**이라고 부른다.

<u>파선은 파면에 수직이다</u>.

후이겐스의 원리

후이겐스는 파동의 전파에 대하여 다음과 같이 생각하였다.

파동이 전파될 때에 어떤 순간의 한 파면(그림 2-22에서 $t=0$ 인 순간 파면)우의 매 점들은 진동하므로 그 점들이 그 순간의 파원이 되여 새로운 구면파(**요소파**라고 부른다.)를 발생시킨다.

이 요소파들의 파면에 공통으로 접하는 면(그림 2-22에서 Δt[s]후)이 다음 순간의 파면으로 된다. 공통으로 접하는 면을 **포락면**이라고 부른다.

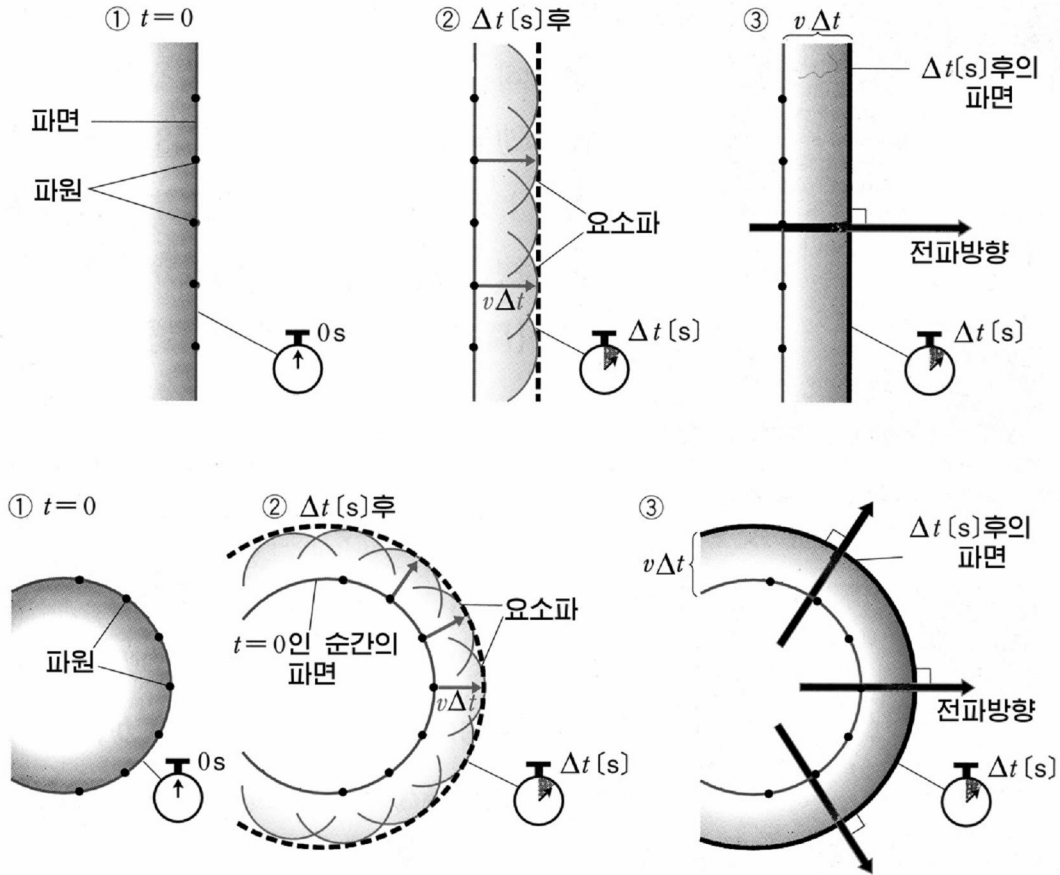



그림 2-22. 후이겐스의 원리

파동이 퍼질 때 임의의 파면우의 모든 점들은 점파원으로 되여 요소파를 발생시키며 이 요소파의 파면들의 포락면이 다음 파면으로 된다. 이것을 **후이겐스의 원리**라고 부른다.

이 원리에 의하면 평면파나 구면파의 파면을 그릴수 있으며 파동의 전파방향도 찾아낼수 있다.

파동의 에돌이

바다기슭으로 밀려드는 파도를 자세히 살펴보면 파도가 바위를 지나면서 에돌아가는것을 볼수 있다.(그림 2-23)

그림 2-23. 바위뒤에 생기는 물결의 그림자

이와 같이 파동이 장애물을 만나 그 틈이나 기슭을 지나면서 일부가 방향을 바꾸

어 전파되는 현상을 **파동의 에돌이**라고 부른다.

(?) 장애물뒤에서 파동의 모양은 어떻게 되며 틈을 지날 때 파동이 퍼지는 방향은 틈의 크기에 따라 어떻게 되는가.

실험

○ 물면파실험기구의 물그릇에 물결을 일구고 크기가 다른 가림판(장애물)들로 파면을 막으면서 그 뒤부분의 파동을 살핀다.(그림 2-24)

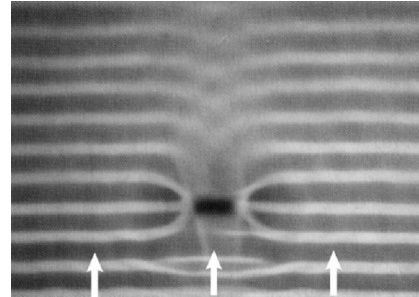



그림 2-24. 장애물뒤의 에돌이파

○ 두개의 가림판으로 틈을 만들고 틈의 너비를 변화시키면서 그것을 지난 파동을 살핀다.(그림 2-25)

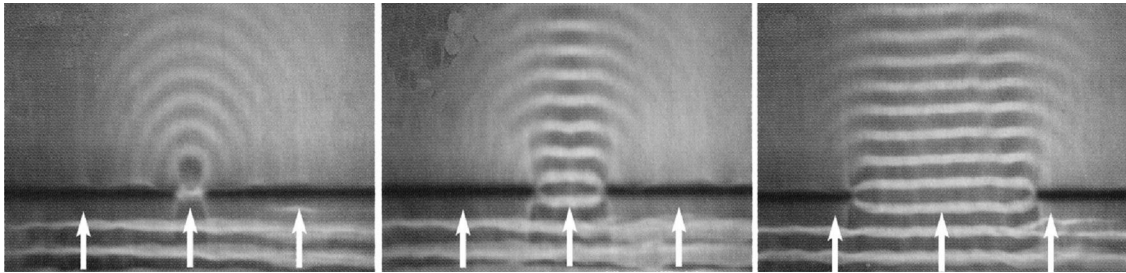



그림 2-25. 틈의 너비에 따르는 파동의 모양

실험으로부터 무엇을 알수 있는가.

장애물이나 틈이 파장보다 크지 않을 때에는 에돌이가 심하게 나타나면서 파동은 넓은 구역으로 퍼진다.

그러나 장애물이나 틈이 크면 기슭에서만 에돌이하는 파동이 약간 생기고 대부분의 파동은 에돌지 않고 곧추 나간다. 그러므로 장애물이나 가림판뒤에는 파도가 없고 《물결의 그림자》가 생긴다.

일반적으로 파동의 에돌이현상은 장애물이나 틈의 크기가 파장정도일 때 잘 나타난다.

후이겐스의 원리를 쓰면 파동의 에돌이현상을 잘 설명할수 있다. 그림 2-26에서 보는것처럼 장애물이나 틈에 도달한 파면이 매 점으로부터 퍼져나가는 요소파들을 그려보면 장애물이나 틈의 기슭에서 파면이 구부러지므로 전파방향이 변하는것을 알수 있다.

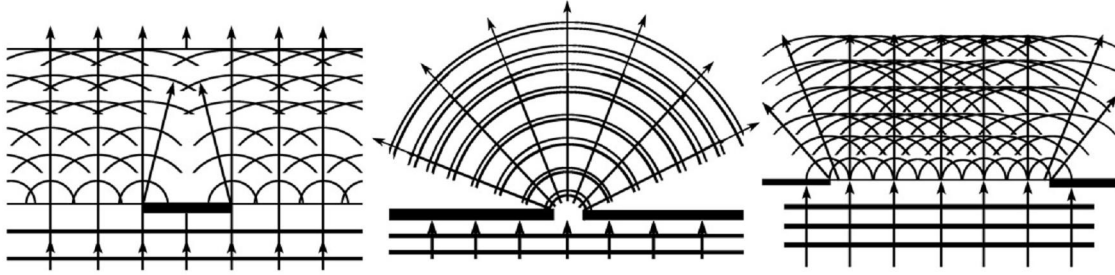



그림 2-26. 후이겐스의 원리에 의한 파동의 에돌이설명

문제

1. 후이겐스의 원리를 써서 어떤 순간의 파면이 평면이라면 다음 순간의 파면이 어떻게 되겠는지 그려보아라.
2. 후이겐스의 원리를 써서 장애물이 있을 때 파동이 에도는 리치를 설명하여라.
3. 그림 2-27에서와 같이 하나의 점파원에서 나오는 파동은 2개의 실틈을 지난 다음 간섭을 일으킨다. 그 리유를 설명하여라.

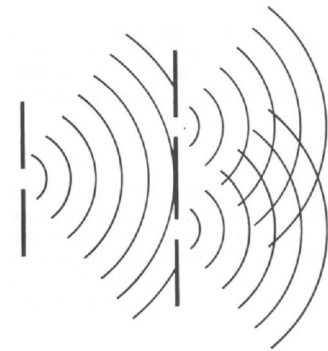



그림 2-27

제6절. 소리파의 성질

소리파

고무마치로 음차를 때리면 소리를 들을수 있다. 각종 관악기는 공기기둥의 진동에 의하여 소리를 낸다. 바이올린이나 기타와 같은 현악기의 줄을 튕기면 줄이 진동하면서 소리가 난다.(그림 2-28)

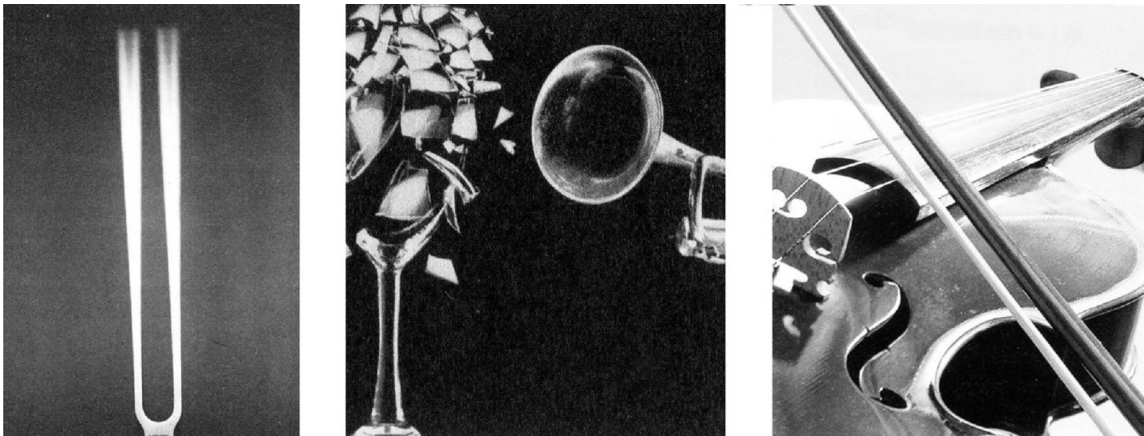



그림 2-28. 소리의 발생

진동하면서 소리를 내는 물체를 **음원**이라고 부른다.

소리는 어떻게 전파되는가.

악기줄을 튕기거나 고성기의 진동종이가 진동하면 그 가까이의 공기가 배졌다성글어졌다하면서 진동한다.

배진 부분의 공기는 압력이 커서 주위의 공기를 밀고 성글어진 부분의 공기는 압력이 작아 주위의 공기를 당긴다. 이에 따라 공기의 밀도가 주기적으로 변하면서 진동이 이웃부분에로 전달되여 간다.(그림 2-29) 이 파동이 우리 귀의 고막을 울린다.

그림 2-29. 공기속에서 소리의 전파

소리는 진공속에서는 퍼지지 못하고 고체, 액체, 기체 등 튐성매질속에서 퍼지는 튐성파이다.

튐성매질속에서 퍼지는 진폭이 작은 세로파를 **소리파**라고 부른다. 진동수가 16～20 000Hz인 소리파가 귀에 들어오면 압력의 주기적인 변화에 의하여 고막이 진동하여 듣는 감각이 일어난다. 이러한 소리파를 보통 **소리**라고 부른다.

진동수가 대단히 작거나 크면 듣는 감각을 일으키지 못한다.

진동수가 16Hz이하인 소리파를 **아음파**, 20 000Hz이상인 소리파를 **초음파**라고 부른다.

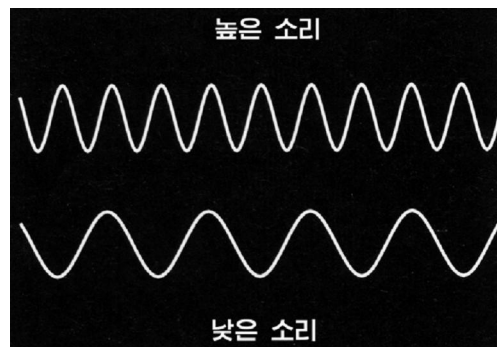
소리의 세 요소

소리의 높이, 크기, 색갈(음색)의 세 요소를 **소리의 세 요소**라고 부른다.

소리의 높이는 진동수에 관계된다.(그림 2-30)

진동수가 크면 높은 소리, 진동수가 작으면 낮은 소리로 들린다.

그림 2-30. 소리의 높이와 진동수

소리의 높이가 진동수에 관계된다고 하여 높이가 진동수에 비례

하는것은 아니다. 즉 진동수가 2배 커졌다고 하여 소리가 2배 높아지는것이 아니다. 음계의 한 옥타브는 진동수로 보면 2배에 해당한다.

소리의 크기는 진폭에 관계된다.(그림 2-31)

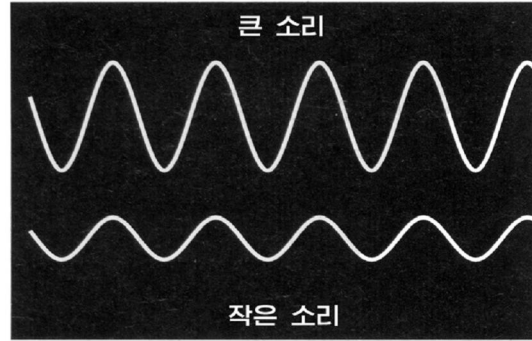



그림 2-31. 소리의 크기와 진폭

북을 약하게 칠 때와 세게 칠 때 우리의 귀에 작용하는 듣는 감각이 서로 다르다. 기타의 같은 줄을 세게 튕길 때와 약하게 튕길 때도 마찬가지이다.

진동수가 같은 소리(같은 높이의 소리)라고 하여도 진폭이 크면 큰 소리로 들리고 진폭이 작으면 작은 소리로 들린다. 즉 주어진 진동수의 소리는 진폭이 클수록 크게 들린다.

그러나 소리의 크기는 세기에 비례하지 않고 세기의 로그에 비례한다.

소리의 색갈(음색)은 음원의 진동특성에 관계되는 소리의 성질이다.

소리의 높이와 크기가 같아도 음원의 종류가 다를 때 그 소리들을 구별할수 있는것은 음원마다 자기의 고유한 진동특성을 가지고있기때문이다. 실례로 눈으로 보지 않고 듣기만 하여도 말하는 사람이 누구이며 악기소리가 어떤 악기에서 나는 소리인가 하는것을 가려내는것은 사람마다 또 악기마다 자기의 고유한 음색을 가지고있기때문이다. 음색은 음원이 내는 소리의 구체적인 파모양에 관계된다.(그림 2-32)

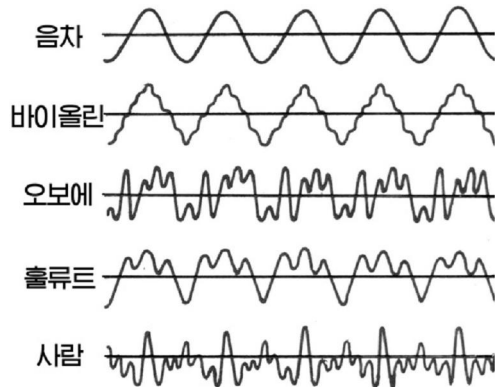



그림 2-32. 파모양

음원에서는 기본진동수의 소리(기본음)에 배진동수의 소리(배음)들이 섞이여 나온다. 음원의 구조에 따라 배진동수의 소리들이 섞이는 비률이 달라서 음원마다 내는 소리가 다르게 들린다.

소리파의 성질

소리파는 매질의 튐성이 클수록 큰 속도로 전파되며 밀도가 클

수록 관성이 커서 더 천천히 전파된다.

공기속에서 소리의 전파속도는 공기의 온도 t에 다음과 같이 관계된다.

$v=331.5+0.6t$ [m/s] 공기속에서 소리의 전파속도 (1)

0℃일 때 소리의 전파속도는 331.5m/s이므로 온도가 1℃씩 높아질 때 소리의 전파속도는 0.6m/s만큼씩 커진다.

몇가지 물질속에서 소리의 속도

물 질	온 도[℃]	소리속도[m/s]
공기	0	331.5
물	25	1 497
바다물	17	1 512～1 550
강철	20	6 100

소리는 공기속에서 전파되다가 장애물을 만나면 일부는 흡수되고 일부는 반사되여 되돌아온다.(그림 2-33)

사람의 귀는 시간간격이 $\frac{1}{15}$ s이상인 같은 두 소리를 갈라서 듣는다.

그림 2-33. 메아리현상

그러므로 먼곳에 장애물이 있을 때에는 같은 소리가 두번 들린다. 그것은 장애물에서 반사되여 귀에 와닿는 소리가 있기때문이다. 메아리현상은 소리가 반사되기때문에 생긴다.

공기속에서 소리는 굴절된다. 소리가 굴절된다는것은 밤에 멀리서 울리는 기적소리나 말소리가 낮보다 더 잘 들려오는것을 통하여 알수 있다.

소리가 파동의 일종이라는것은 간섭과 에돌이를 통해서도 알수 있다.

그림 2-34의 ㄱ와 같이 적당히 떨어져있는 두 고성기를 같은 진동수의 소리를 내게 하고 그앞을 지나가보면 소리가 크게 들리는 곳과 작게 들리는 곳이 있다. 또한 음차를 진동시키고 그 주위를

한바퀴 돌아보면 크게 들리는 곳과 작게 들리는 곳이 있다.(그림 2-34의 ㄴ)

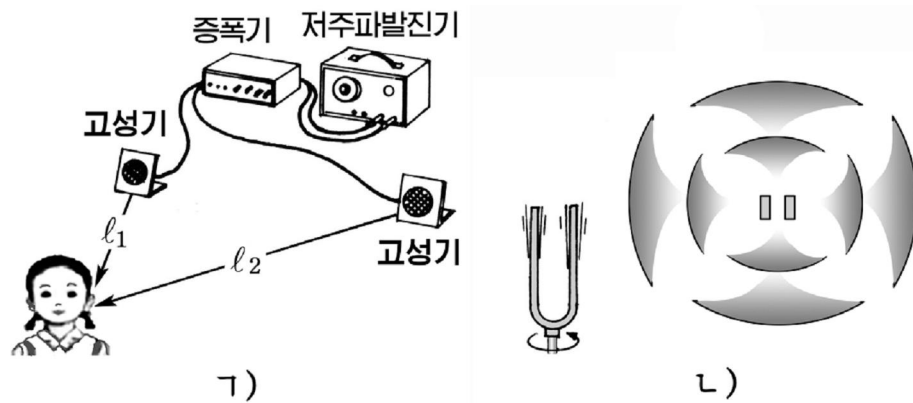



그림 2-34. 소리의 간섭

이것은 소리파에서 간섭현상이 일어난다는것을 보여준다.

소리파는 파장이 수십cm～수십m로서 매우 길기때문에 장애물이나 틈이 비교적 커도 에돌이현상이 잘 나타난다.

생각하기 낮에는 땅면에서 우로 올라갈수록 온도가 낮아지고 밤에는 땅으로 내려올수록 온도가 낮아지는것을 리용하여 낮에 소리가 잘 들리지 않고 밤에 소리가 잘 들리는 현상을 그림 2-35를 보면서 생각해보아라.

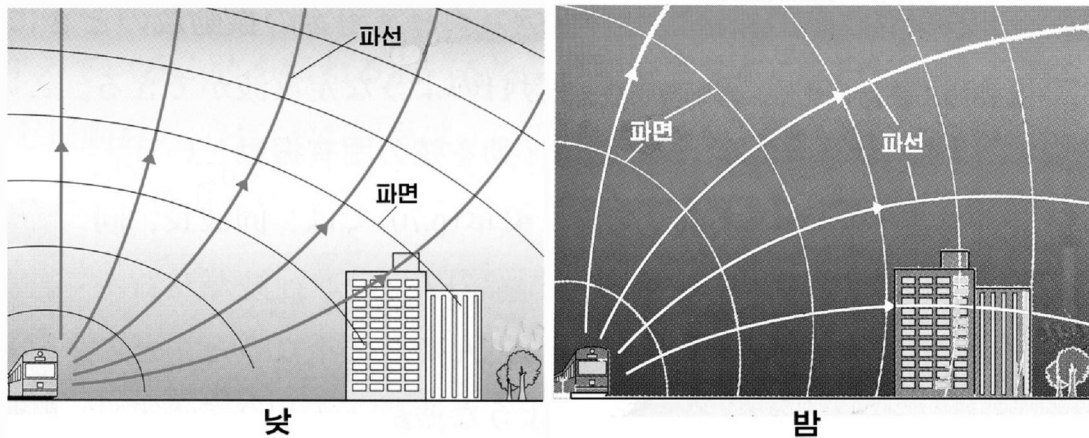



그림 2-35. 공기속에서 소리의 굴절

문제

1. 꿀벌, 풍뎅이, 모기 등 벌레들이 날 때 나는 소리를 비교하고 차이점과 그 원인을 설명하여라.
2. 기온이 25℃인 대기속에서 소리의 파장범위와 《라》음의 파장

을 구하여라. 《라》음의 진동수는 440Hz이다.

3. 다음 글에서 틀린것을 찾고 그 근거를 밝히여라.
   ㄱ) 높은 소리일수록 반드시 파장이 짧다.
   ㄴ) 진동수가 큰 소리는 반드시 크게 들린다.
   ㄷ) 소리의 크기는 소리파의 세기에 비례한다.
   ㄹ) 《아》와 《이》는 소리색갈이 다른 소리이다.
   ㅁ) 공기속에서 소리의 전파속도는 물속에서보다 빠르다.

제7절. 소리의 공명

공명

바이올린이나 기타, 가야금의 줄을 튕기면 선이 진동하면서 울림통도 껴울린다.

실험

○ 그림 2-36과 같이 진동수가 서로 다른 두 음차를 그의 울림통의 열린쪽이 마주 향하도록 놓고 그가운데 하나를 마치로 때려 울리도록 한다. 다른 음차는 울리지 않는다.

○ 다음에는 진동수가 같은 두개의 음차를 가지고 우와 같은 실험을 해본다. 다른 음차도 함께 울린다.

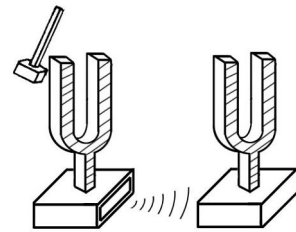



그림 2-36. 음차의 공명

소리는 어떻게 생기며 이런 현상은 왜 일어나는가.

한 음차가 진동하면 그와 이어진 울림통이 울리면서 소리가 생겨 울림통밖으로 전파되여나간다. 이 소리는 옆에 있는 울림통에 강제진동을 일으킨다. 이때 이것과 이어진 음차의 고유진동수가 넘겨받는 소리의 진동수와 같으면 공진되면서 음차가 소리를 낸다.

이처럼 소리를 내는 물체에 그의 고유진동수와 같은 진동수의 소리파가 작용할 때 껴울리는 현상을 **공명**이라고 부른다.

바이올린이나 기타, 가야금 같은데서 줄만 진동해서는 은은하고 긴 여운을 남기는 소리가 나지 않는다. 악기들에는 공명을 일으켜 소리를 크게, 부드럽게 하는 공명통이 있다.

줄의 고유진동

가야금이나 기타와 같은 두끝을 고정한 줄을 튕기면 줄을 따라 퍼지던 파동이 량끝에서 반사하면서 정상파가 생긴다. 정상파의 가장 가까운 마디사이거리는 반파장이므로 줄에는 반파장의 옹근수배인 마디가 생긴다.

끝이 고정된 줄에 정상파가 이루어지면 그 줄에서 고유진동이 일어난다.

줄을 따라 퍼지는 파동의 속도가 v라면 고유진동수는 다음과 같다.

$$\nu_n = \frac{v}{\lambda_n} = \frac{v}{2\ell} n \quad (n=1,\ 2,\ \cdots) \qquad \text{줄의 고유진동수}$$

줄의 고유진동수는 실의 길이에 거꿀비례하고 파동의 전파속도에는 비례한다.

기본진동($n=1$)에 의하여 나는 소리를 **기본음,** 배진동($n=2,\ 3,\ \cdots$)에 의하여 나는 소리들을 **배음**이라고 부른다.

악기에서 나는 소리의 높이는 기본음의 진동수에 의하여 규정되며 배음들의 세기비에 의하여 소리색갈이 결정된다.

공기기둥의 공명

피리와 같이 좁은 관을 불거나 관에 난 구멍으로 공기가 스쳐지나게 하면 관속의 공기가 압축되였다붙어났다하면서 세로파가 생기고 이것이 관속을 오고가면서 정상파를 만든다. 이때 막힌 끝에는 마디가 놓이고 열린 끝에는 배가 놓인다.

이러한 진동이 공기기둥의 고유진동이다. 관악기소리는 공기기둥의 고유진동에 의하여 생긴다.

고유진동이 일어나고있는 관속에는 반파장이 다음과 같이 들어있다.

한끝만 열린 관에서(그림 2-37)

$$\ell = \left(n - \frac{1}{2}\right) \frac{\lambda_n}{2} \quad (n=1,\ 2,\ \cdots)$$

두끝이 다 열린 관에서(그림 2-38)

$$\ell = n\frac{\lambda_n}{2} \quad (n=1, 2, \cdots)$$

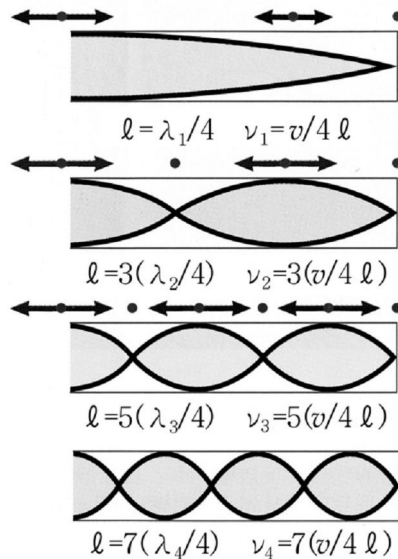



그림 2-37. 한끝만 열린 관에서 공기기둥의 고유진동

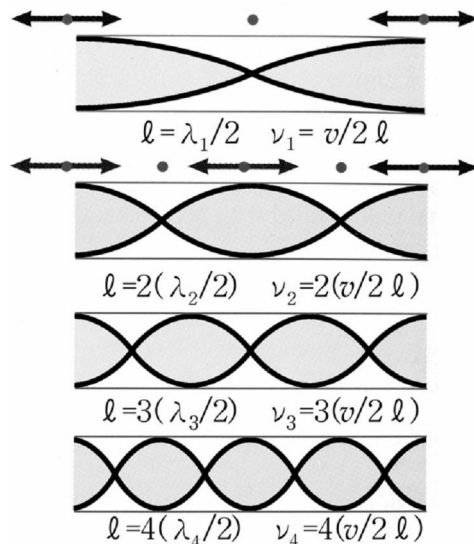



그림 2-38. 두끝이 열린 관에서 공기기둥의 고유진동

공기기둥속에서 소리속도가 v라면 파장 λ와 고유진동수 ν는 다음과 같이 결정된다.

$\lambda_n = \dfrac{4\ell}{2n-1}$, $\quad v_n = \dfrac{(2n-1)v}{4\ell}$	한끝만 열린 관에서 파장, 고유진동수
$\lambda_n = \dfrac{2\ell}{n}$, $\quad v_n = \dfrac{nv}{2\ell}$	두끝이 다 열린 관에서 파장, 고유진동수

공명현상을 리용하여 공기속에서의 소리의 파장과 속도를 잴수 있다.

그림 2-39를 보면서 공명현상을 리용하여 공기속에서의 소리의 파장을 재는 원리를 생각해보아라.

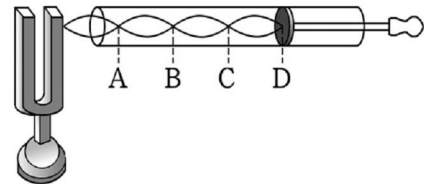



그림 2-39. 공기기둥의 공명실험

문제

1. 소리의 공명이 생기는것을 악기를 실레들어 설명하여라.
2. 공기기둥의 길이가 12.5cm인 한끝이 막힌 관의 기본음의 파장과 기본진동수는 얼마인가? 소리의 속도는 340m/s이다.
3. 소리의 공명과 소리의 반사는 어떤 차이가 있는가?

제8절. 초음파와 아음파

초음파

초음파는 진동수가 20 000Hz를 넘는 소리파로서 사람은 듣지 못하지만 일부 새나 개, 고래, 박쥐 등 동물들이 들을수 있다.(그림 2-40)

초음파는 어떤 성질을 가지며 어떻게 리용되는가.

그림 2-40. 박쥐는 초음파를 내보내기도 하고 듣기도 한다

초음파는 파장이 짧기때문에 에돌이능력이 약하고 곧추 나간다. 즉 초음파는 곧추 나가는 성질이 강하며 다른 물질의 경계에서 잘 반사된다.

그러므로 초음파의 지향성을 리용하여 바다의 깊이를 재거나(그림 2-41의 ㄱ) 물고기떼를 찾고(그림 2-41의 ㄴ) 물속에서 통신을 보장한다. 초음파를 내보내여 물고기떼에서 반사되여오는 파를 잡아 그것이 되돌아오는데 걸린 시간, 초음파의 세기와 방향을 재면 물고기떼의 크기와 자리를 알아낼수 있다.(초음파어군탐지기)

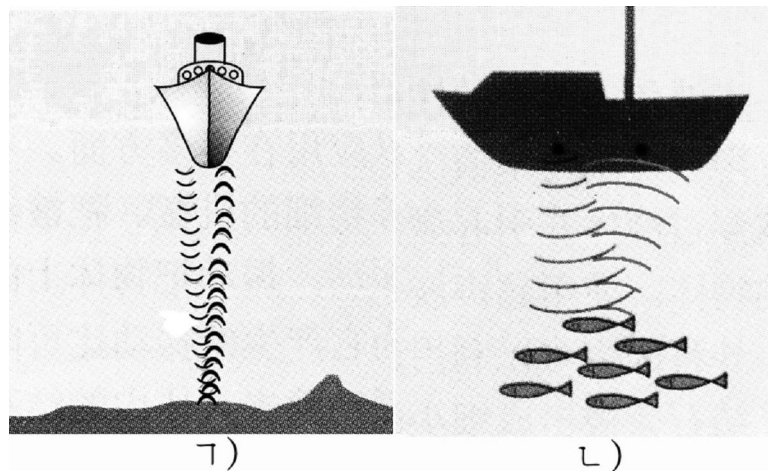



그림 2-41. 바다의 깊이와 물고기떼까지의 거리를 측정한다

초음파는 공기속에서보다 액체나 특히 고체속에서 흡수되지 않고 더 잘 전파된다.(투과능력) 초음파의 투과능력과 반사를 리용하여 금속내부의 흠집이나 콩크리트구조물, 가소물제품 및 저수지의 뚝내부의 흠집을 찾아내는 초음파결함탐지기도 만들수 있다.

초음파는 그의 세기가 매우 크므로 유리, 수정, 규소와 같은 굳

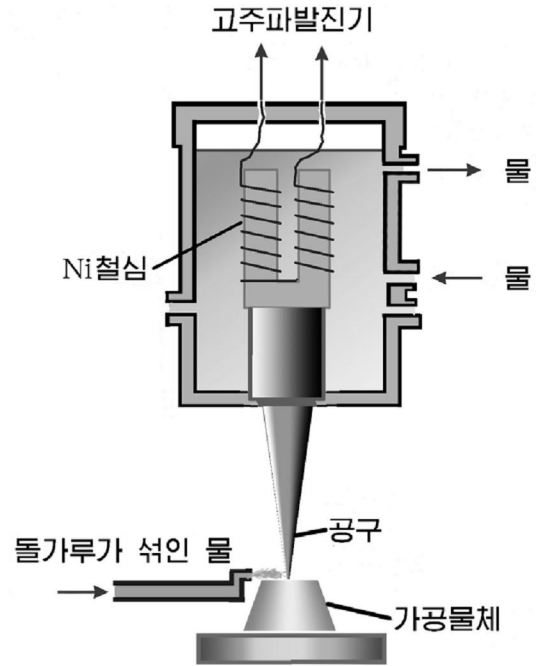
고 부스러지기 쉬운 물체를 가공하는데 리용한다.(그림 2-42) 초음파의 작용으로 큰 진동가속도를 얻은 돌가루들은 가공대상의 겉면에 센 충격을 주어 뜯어낸다.

그림 2-42. 초음파가공의 원리

초음파는 공동효과를 일으킨다. 세로파인 초음파가 액체속으로 퍼질 때 매질의 주기적인 압축, 팽창이 빨리 일어나므로 압력변화가 심하다. 압력이 낮아지는 동안에는 액체가 성긴 곳으로 액체속의 기체가 몰려들어 기포가 생기고 그속으로 수증기가 들어간다. 그다음 압력이 높아지는 동안에는 그 기포들이 압축되는데 그 과정이 매우 짧은 시간동안에 일어나므로 온도가 급격히 올라가고 압력도 수백MPa로 되여 기포들이 순식간에 파괴되면서 충격파가 생긴다.

이렇게 초음파가 액체속으로 퍼질 때 온도와 압력 등 여러가지 특성량들의 급격한 변화가 함께 일어난다. 이 현상을 **초음파공동현상**이라고 부른다.

이 현상에 의하여 초음파가 퍼지는 액체속에 들어있는 다른 액체의 방울이나 고체알갱이들의 겉면이 쉽게 파괴되여 액체속에 잘 섞인다. 실례로 보통때 섞이지 않는 물과 기름도 초음파의 작용으로 섞을수 있으며(유탁액) 액체에 고체가루를 섞을수 있다.(현탁액) 또한 초음파공동현상은 제품에 묻은 기름때나 산화막 같은것을 깨끗이 씻어내며 물감알갱이들을 작게 부스러뜨려주어 천에 물감이 잘 들게도 한다.

초음파는 또한 의료분야에서 복부초음파진단기로 병을 진단하는데 리용되며 세균과 같은 생물체를 쉽게 죽일수도 있다. 약한 초음파는 사람들의 물질대사를 촉진하는 작용이 있어서 병치료에 매우 효과적이다.

아음파

아음파는 사람의 귀로 들을수 없는 작은 진동수(16Hz이하)를 가진 소리파이다.

아음파는 지진, 우뢰, 방전 등으로 자연계에서 생겨나며 폭발에 의해 발생시킬수도 있다.

아음파는 보통 들리는 잡음과 함께 자주 일어나므로 개별적으로 수감하기 힘들 때가 많다.

아음파의 본질적인 특성은 파장이 길기때문에 에돌이능력이 강하며 따라서 흡수가 작은것이다. 그러므로 아음파는 발생하면 먼곳까지 전파되므로 먼곳에서 일어난 지진이나 폭발을 탐지할수 있다.

아음파는 사람몸의 기능에 여러가지 측면에서 부정적영향을 미친다. 사람의 고유진동수는 서있을 때 5~12Hz, 누워있을 때 3~4Hz이며 가슴근육의 고유진동수는 5~8Hz로 보고있다. 그러므로 이러한 대역의 아음파는 세기에 따라 차이나지만 사람의 몸에 작용하면 공진효과를 일으키면서 커다란 피해를 줄수 있다. 이러한 원리를 리용하여 아음파무기(아음파발생장치)를 만들어 유생력량을 소멸할수 있다.

[례제] 어군탐지기로 바다속에 진동수가 80kHz인 초음파를 보냈더니 0.5s 지나서 신호가 돌아왔다. 고기떼까지의 거리를 구하여라. 물속에서 소리파의 전파속도는 약 1 500m/s이다.

풀이. 주어진것: $t=0.5\text{s}$

$v=1\ 500\text{m/s}$

구하는것: S?

$$S=\frac{1}{2}vt=\frac{1}{2}\times 1\ 500\times 0.5=375(\text{m})$$

답. 375m

문제

1. 바다물(소리속도 1 530m/s)속으로 초음파를 내보냈더니 고기떼에서 반사하여 0.35~0.42s사이에서 반사파가 관측되였다. 고기떼까지의 거리와 고기떼의 두께는 얼마인가?
2. 초음파와 아음파의 차이점은 무엇인가?
3. 아음파로 바다물속에 있는 고기떼를 알아내지 못하는 리유를 설명하여라.

참고 충격파

폭발이나 분사식비행기관의 가스분출 그리고 총탄, 폭탄, 초음속비행기가 운동할 때는 매우 높은 압력과 밀도의 변화가 생겨 소리속도보다 더 빠른 속도로 퍼져나간다.

압력, 밀도 등 물리적량들의 불련속적인 변화가 소리속도보다 더 큰 속도로 퍼져나가는 과정을 **충격파**라고 부른다.(그림 2-43)

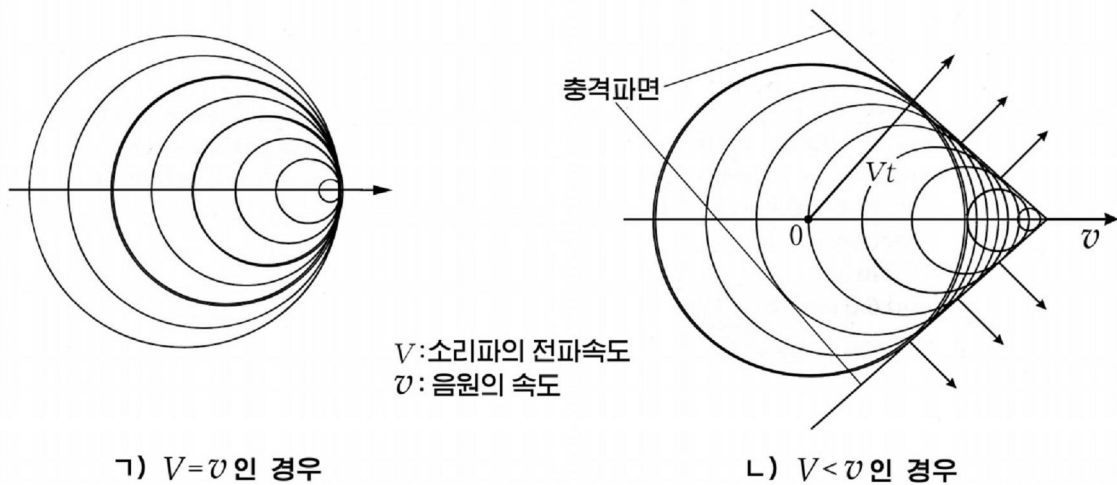



그림 2-43. 초음속으로 운동하는 물체앞뒤의 충격파전선

충격파는 모든 튐성매질속에서 형성되여 전파된다. 장약이 폭발할 때, 기체속으로 물체가 초음속으로 운동할 때 그리고 전기불꽃방전(례하면 번개와 벼락)이 일어날 때도 생긴다.

충격파는 에네르기를 전파한다는 점에서는 소리파와 공통점을 가지지만 본질적인 차이가 있다. 소리파가 전파할 때에는 매질알갱이들이 퍼져나가지 않지만 충격파의 전파과정에는 매질의 흐름이 뒤따른다.

충격파는 국방분야와 인민경제 여러 부문에서 널리 리용되고있다.

제9절. 도플러효과

방송차나 구급차가 소리를 내면서 지나갈 때 그 소리가 높아지거나 낮아지는것을 느낄수 있다.(그림 2-44)

일반적으로 파원과 관측자가 서로 가까와지거나 멀어질 때에 파원이 내는 파동의 진동수와는 다른 진동수가 관측되는 현상을 **도플러효과**(또는 **진동수변화효과**)라고 부른다.

파원이 움직일 때의 도플러효과

그림 2-44. 음원이 다가오거나 멀어질 때 소리의 높이변화

관측자와 음원이 정지해있으면 관측자가 듣는 소리의 진동수는 음원이 내는 소리의 진동수와 같다. 그러나 음원이 이동할 때에는 정지한 관측자가 듣는 소리의 진동수가 음원이 내는 소리의 진동수와 다르다.

그림 2-45에서와 같이 파원이 운동하면 파면들은 파원의 앞뒤에서 파장이 달라진다.

파원이 v_S의 속도로 운동하면서 진동수가 ν_0인 파동을 V의 속도로 내보낸다고 하자.

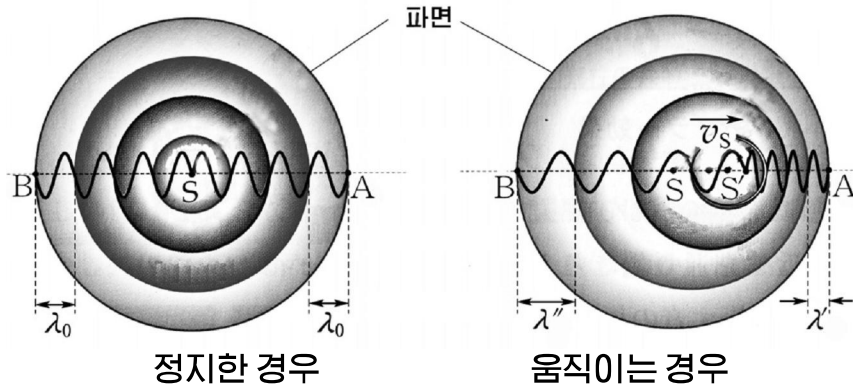



그림 2-45. 파원이 움직일 때 파면

$t=0$인 순간에 파원이 S점에서 내보낸 파동은 t초후에 반경이 Vt인 구면에 이른다. 파원은 이사이에 $\nu_0 t$개의 마루를 내보내면서 $v_S t$만큼 이동하여 S′점으로 간다.

그러므로 파원의 앞방향(A방향)에는 $\overline{S'A}=(V-v_S)t$만 한 구간에, 뒤방향(B방향)에는 $\overline{S'B}=(V+v_S)t$만 한 구간에 $\nu_0 t$개의 파동이 놓이게 된다. 따라서 움직이는 파원의 앞뒤에서 관측되는 파동의 파장과 진동수는 다음과 같다.

파원이 가까와질 때 $\lambda'=\dfrac{V-v_S}{\nu_0}$이므로

$$\nu'=\frac{V}{\lambda'}=\frac{V}{V-v_S}\nu_0 \quad (\nu'>\nu_0) \qquad (1)$$

파원이 멀어질 때 $\lambda'' = \dfrac{V+v_S}{\nu_0}$ 이므로

$$\nu'' = \frac{V}{\lambda''} = \frac{V}{V+v_S}\nu_0 \quad (\nu'' < \nu_0) \qquad (2)$$

식 1, 2에서 보는것처럼 파원이 다가오면 파장이 짧게 관측되므로 소리는 높게 들리고 파원이 멀어지면 파장은 길게 관측되므로 소리는 낮게 들린다.

관측자가 운동할 때의 도플러효과

정지한 파원이 내는 소리를 관측자가 움직이면서 들으면 어떻게 들리겠는가.

관측자가 v_0의 속도로 운동하면서 파장이 λ인 파동을 관측한다고 하자. 파원은 멎어있고 파동의 속도는 V이다.

파원에 접근하는 관측자는 파동을 마주 향해가므로 그에게는 파동이 $(V+v_0)$만 한 속도로 지나가는것으로 된다. 그러므로 관측자가 파동의 전파방향과 반대로 움직이는 경우에는 단위시간당 관측자를 지나는 파동의 마루개수가 관측자의 속도 v_0 이 커짐에 따라 더 증가하므로 관측되는 진동수는 다음과 같다.

$$\nu' = \frac{V+v_0}{\lambda} = \frac{V+v_0}{V/\nu_0} = \frac{V+v_0}{V}\nu_0 \quad (\nu' > \nu_0) \quad (3)$$

파원으로부터 멀어져가는 관측자에게는 파동이 $(V-v_0)$만 한 속도로 지나가는것으로 된다.(그림 2-46) 그러므로 파동의 전파방향으로 움직이면서 관측할 때 관측되는 진동수는 다음과 같다.

$$\nu'' = \frac{V-v_0}{\lambda} = \frac{V-v_0}{V/\nu_0} = \frac{V-v_0}{V}\nu_0 \quad (\nu'' < \nu_0) \qquad (4)$$

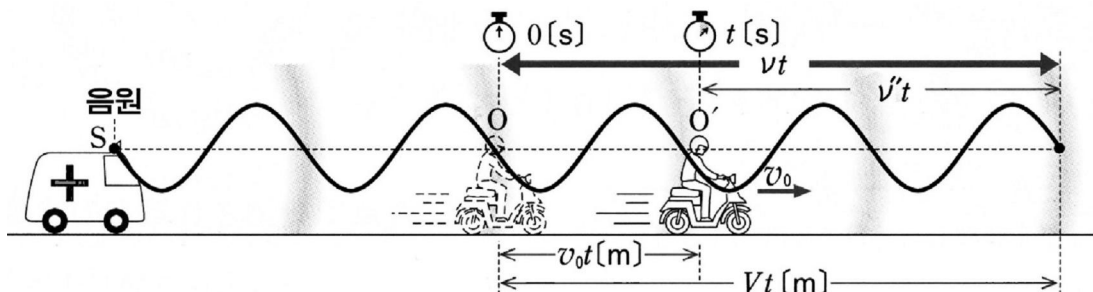



그림 2-46. 관측자가 운동할 때 관측되는 진동수

식 3, 4에서 보는것처럼 관측자가 파원에 다가가면 진동수는 커지며 소리가 높게 들리고 멀어지면 진동수가 작아져 소리는 낮게 들린다.

파원과 관측자가 둘다 움직일 때 도플러효과

파원으로부터 멀어질 때와 가까와질 때 관측되는 진동수는 어떻게 변화되는가.

식 1과 3을 리용하면 파원은 v_S라는 속도로, 관측자는 v_0이라는 속도로 움직일 때 파원이 내보내는 파동의 진동수 ν_0과 관측되는 진동수 ν사이에 다음과 같은 관계식을 얻는다.

$$\nu = \frac{V \pm v_0}{V \mp v_S} \nu_0$$ 파원과 관측자가 둘다 움직일 때 진동수변화

여기서 v_0과 v_S는 파동의 전파속도 V의 방향을 기준으로 부호를 정한다. 즉 관측자나 파원이 파동의 전파방향으로 움직일 때 +로, 파동의 전파방향과 반대로 움직일 때 −로 한다.(그림 2-47)

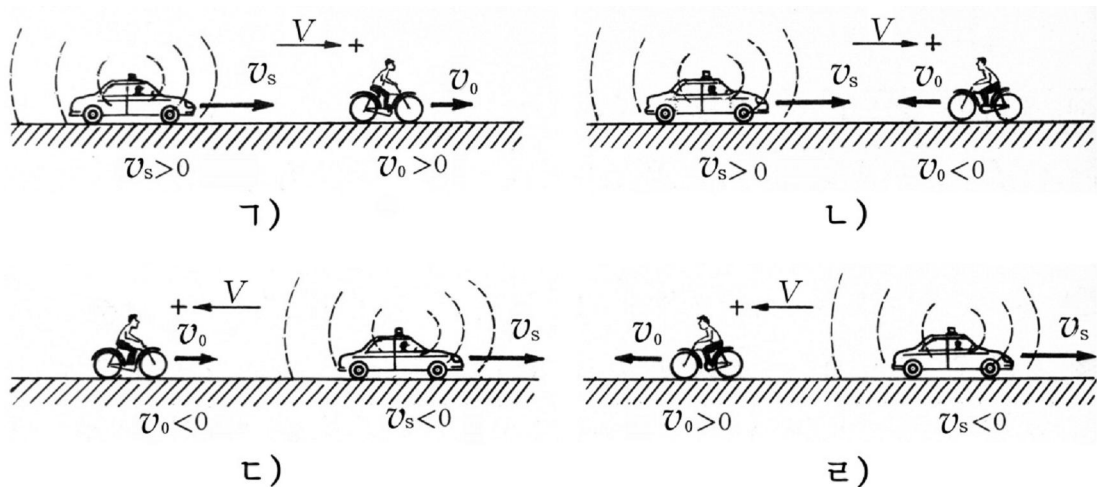



그림 2-47. 파원과 관측자가 다 움직일 때 진동수변화

웃식으로부터 다음과 같은 결론이 나온다.

<u>관측되는 파동의 진동수는 파원과 관측자가 멀어지면 작아지고 가까와지면 커진다</u>.

도플러효과는 여러가지 파동에서 다 나타난다.

문제

1. 진동수가 440Hz인 소리를 내는 자동차가 20m/s의 속도로 사람의 곁을 지나갈 때 소리의 진동수는 어떻게 변하여 들리겠는가? 소리의 전파속도는 340m/s이다.
2. 렬차가 640Hz의 기적을 울리면서 20m/s의 속도로 사람의 앞을 지난다. 소리의 속도는 340m/s이다. 렬차가 사람에게로 접근하는 경우와 멀어지는 경우에 들리는 소리의 진동수, 파장을 구하여라. 기차가 달리는 방향으로 10m/s의 속도로 바람이 분다면 사람에게로 접근해오는 렬차의 기적소리의 진동수는 얼마겠는가?
3. 배가 300Hz의 고동소리를 내면서 5m/s의 속도로 절벽에 다가갈 때 배에서는 절벽에서 반사된 어떤 진동수의 소리를 듣겠는가? 소리의 전파속도는 340m/s이다.

복습문제(1)

1. 길이가 20m인 배가 파도가 밀려오는 방향으로 마주서서 닻을 내리고있다. 파도에 의하여 배머리가 들렸다가 다시 들릴 때까지 걸리는 시간은 4.5s이고 배머리가 들린 때로부터 2.5s뒤에 배뒤부분이 들린다. 파도의 진동수, 파장, 전파속도는 얼마인가?

   (답. 0.22Hz, 36m, 8m/s)
2. 퍼져나가는 속도가 10m/s인 파도와 같은 방향으로 배가 5m/s의 속도로 가고있다. 이때 파도의 마루가 배전의 한 점을 지나간 때로부터 다음 마루가 지나갈 때까지의 시간이 10s라면 파도의 주기는 얼마이겠는가?

   (답. 5s)
3. t인 순간(실선)과 $t' = t + 0.1\text{s}$ 인 순간(점선)의 파모양이 주어졌다.(그림 2-48) 다음 물음에 대답하여라.

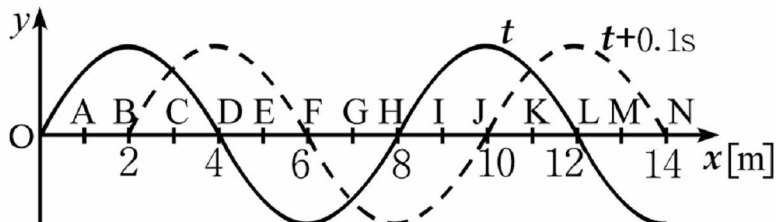



그림 2-48

ㄱ) 파동의 전파방향, 전파속도 및 진동주기는 얼마인가?
ㄴ) 0.5s동안의 자리각변화는 얼마인가?

(**답.** ㄱ) x방향, 20m/s, 0.4s ㄴ) 2.5π)

4. 파원의 진폭이 10cm, 진동수가 4Hz, 처음자리각이 0인 진동에서 2.4m/s의 속도로 퍼져나가는 파동식을 써보아라. 그리고 $t=1.5$s인 때의 파모양을 표시하는 식과 그라프, 파원으로부터 $x=1.95$m 떨어진 점의 진동식과 그라프를 그리여라.

(**답.** $y_{(x,\ t)}=0.1\sin2\pi\left(4t-\frac{x}{0.6}\right)$[m],

$y_{(x,\ 1.5)}=0.1\sin2\pi\left(6-\frac{x}{0.6}\right)$[m],

$y_{(1.95,\ t)}=0.1\sin2\pi(4t-3.25)$[m])

5. 파원으로부터 4cm만큼 떨어진 점에서 $T/6$시각의 변위는 진폭의 절반과 같다. 파장을 구하여라.

(**답.** 0.48m)

6. 조화진동식 $y=4\sin600\pi t$[cm]로 떨기 시작하여 0.01s 되는 시각에 파원으로부터 75cm 떨어진 점의 변위를 구하여라. 진동이 퍼져나가는 속도는 300m/s이다.

(**답.** 4cm)

7. 주기가 0.04s인 파동이 $v=350$m/s의 속도로 전파된다. 이 파동이 일어난 곳으로부터 10m, 16m의 거리에 있는 두 점들사이의 자리각차는 얼마인가?

(**답.** $\frac{6}{7}\pi$)

8. 2개의 같은자리각으로 진동하는 간섭성파원으로부터 어떤 점까지의 거리가 각각 70cm, 40cm이다. 이 점으로부터 파원들까지의 거리차가 반파장의 8배라면 파장은 얼마이며 간섭결과는 어떻게 되겠는가?

(**답.** 7.5cm, 극대)

9. 서로 반대자리각으로 떠는 두 파원 A, B가 14cm 떨어져있고 이 파원들로부터 파장이 4cm인 물면파가 퍼져나온다.

ㄱ) 간섭의 극대와 극소가 되는 자리들을 그림에 표시하여라.

ㄴ) 두 파원을 맺는 직선우에는 극대와 극소가 몇개씩 생기겠는가?

(답. ㄴ) 극대: 두 파원 A, B까지 포함하여 8개, 극소: 7개)

10. 그림 2-49와 같이 서로 6m 떨어진 수평면우의 두 점에서 완전히 같은 진동을 하는 파원 A, B가 파장이 2m인 파동을 일으킨다. 선분 AB우에서 정상파의 배가 몇개 생기겠는가? 그리고 선분 AB에 수직이고 B점으로부터 8m 떨어진 점 C는 어떤 진동상태에 있는가?

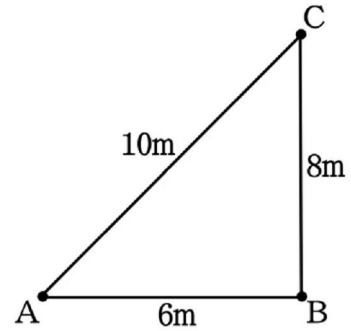



그림 2-49

(답. 6개, C점은 극대)

11. 그림 2-50과 같은 파모양을 가진 시누스파가 x방향으로 퍼지다가 O점으로부터 10m 되는 곳에 있는 x축에 수직인 면으로부터 반사된다. 다음과 같은 경우 O점과 반사면을 포함하여 몇개의 마디와 배가 있는 정상파가 생기겠는가?

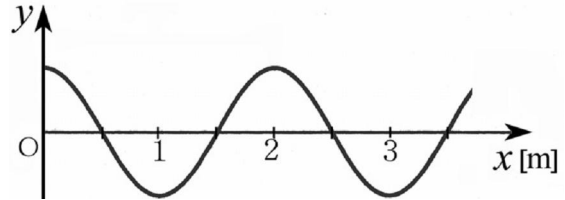



그림 2-50

ㄱ) 파동이 더 밴 매질을 만나 반사될 때

ㄴ) 파동이 더 성긴 매질을 만나 반사될 때

(답. ㄱ) 마디 11개, 배 10개 ㄴ) 마디 10개, 배 11개)

12. 소리의 전파속도는 기체속에서보다 액체속에서 더 크고 액체속에서보다 고체속에서 더 크다. 왜 그런가?

13. 진동수가 500Hz인 바이올린소리가 방안으로부터 바깥으로 퍼져나간다. 방안의 온도는 20℃이고 바깥온도는 5℃이다. 방안과 바깥에서의 소리의 파장은 얼마나 차이나겠는가?

(답. 1.8cm)

14. 그림 2-51과 같이 한 발진기에 이은 두개의 작은 고성기 S_1, S_2이 0.4m 떨어져있으면서 소리를 낸다. S_1, S_2에 평행되게

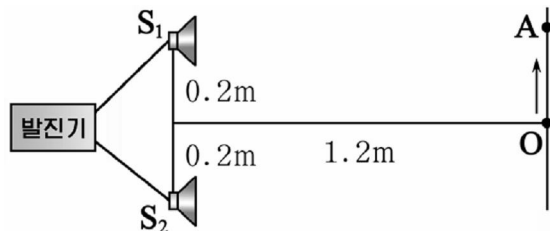



그림 2-51

움직이면서 소리를 들으면 O점으로부터 멀어짐에 따라 소리가 약해지다가 다시 세져서 A점에서 가장 세다. OA=0.7m이고 소리속도가 340m/s라면 발진기에서 일어나는 소리의 진동수는 얼마인가?

(답. 1.7kHz)

15. 길이가 1m인 2개의 꼭같은 줄이 진동하면서 같은 소리를 낸다. 줄 하나는 그대로 두고 다른 하나의 길이를 5mm만큼 줄인 다음 다시 진동하게 하면 진동수가 2Hz만큼 차이나는 소리들을 낸다. 이 줄들의 기본음의 진동수는 얼마인가?

(답. 398Hz, 400Hz)

16. 긴 유리관에 원판이 붙은 막대기를 꽂아 한끝이 열린 공기기둥을 만들고 작은 고성기에서 나는 소리를 들여보낸다.(그림 2-52) 막대기로 원판을 움직이면 원판이 관의 열린 끝으로부터 17.5cm와 55.5cm 거리에 있을 때 소리가 크게 울린다. 진동수가 450Hz라면 소리속도는 얼마인가? 관끝가까이에 생기는 정상파의 배는 어디에 있는가?

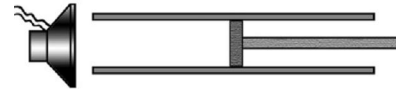



그림 2-52

(답. 342m/s, 1.5cm)

17. 초음파로 금속에 있는 작은 흠집을 찾아내려면 파장이 매우 짧은 초음파를 써야 한다. 그 리유를 말하여라.

18. 진동수가 440Hz인 소리와 50kHz의 초음파가 퍼지고있다.

ㄱ) 온도가 20℃인 공기속에서 이 소리파들의 파장은 얼마인가?

ㄴ) 소리의 속도가 1 450m/s인 물속에서는 이 소리파들의 파장이 얼마인가?

(답. ㄱ) 0.78m, 6.87mm ㄴ) 3.3m, 2.9cm)

19. 길옆에 서있는 사람이 자동차의 발동기소리를 자동차가 접근할 때에 멀어질 때보다 9/8배 높은것으로 느꼈다. 공기속에서 소리의 속도를 340m/s로 보고 자동차의 속도를 구하여라.

(답. 20m/s)

20. 72km/h의 속도로 움직이는 기관차가 2s동안 기적소리를 울렸다. 다음과 같은 경우들에서 사람이 느끼게 되는 기적소리의 겉보기지속시간을 구하여라. 공기속에서 소리의 전파속도는

340m/s이다.

ㄱ) 기관차가 가까이 다가오고있는 경우

ㄴ) 기관차가 멀어지고있는 경우

(답. ㄱ) $1\frac{15}{17}$s ㄴ) $2\frac{2}{17}$s)

21. 기차가 기적을 울리며 오고있다. 멈춰서있는 사람은 그 소리를 3 060Hz, 마주 향하여 달리는 자동차우의 사람은 3 132Hz, 지나친 다음에는 2 656Hz로 들었다. 기적소리의 진동수, 기차, 자동차의 속도를 구하여라. 소리의 속도는 340m/s이다.

(답. 2 880Hz, 20m/s, 8m/s)

복습문제(2)

1. 력학적파동이 퍼지기 위한 조건은 무엇인가?

2. 길이가 15m인 배가 바다우로 전파되는 파동과 같은 방향으로 일정한 속도 4m/s로 전진한다. 하나의 파의 마루가 이 배머리로부터 꼬리까지 지나간 시간은 10s였고 배머리가 한 마루로부터 다음 마루를 따라잡을 때까지 지나간 시간은 6s였다. 바다물의 흐름은 무시한다. 이 파동의 파장과 주기, 전파속도를 구하여라.

(답. 9m, 3.6s, 2.5m/s)

3. 다음 문장에서 옳은것과 틀린것을 지적하고 그 근거를 밝혀라.

ㄱ) 파동의 전파속도는 파장에 비례하고 주기에 거꿀비례한다.

ㄴ) 주어진 매질에서 파장은 진동수에 거꿀비례한다.

ㄷ) 매질이 달라지면 전파속도가 변하므로 진동수도 변한다.

ㄹ) 진폭이 커지면 파장도 커진다.

4. 물속에서 소리의 속도는 v=1 450m/s이다. 진동수가 725Hz라면 반대방향에서 진동하는 가장 가까운 점들은 얼마만한 거리에 있겠는가? (답. 1m)

5. 오른쪽으로 퍼져나가는 파동이 있다. 전파방향에서 어떤 점 P의 변위는 오른쪽으로 1cm 떨어진 점에서보다 0.01s 앞섰다. 또한 점 P의 변위와 반대변위를 하는 점은 P에서 오른쪽으로 50cm 떨어진 곳에 있다. 이 파동의 전파속도, 파장, 진동수를

구하여라.

(답. 1m/s, 1m, 1Hz)

6. x축의 정의 방향으로 전파하는 파장이 0.5m인 가로파가 있다. x=0인 점에서 t시각의 변위가 $y=0.02\sin 24\pi t$[m]로 표시된다. 파동의 전파속도와 파동식을 구하여라.

(답. 6m/s, $0.02\sin 24\pi\left(t-\frac{x}{6}\right)$[m])

7. 점파원으로부터 퍼져나가는 구면파의 식이 $y=\frac{2\times10^{-4}}{r}\sin\pi$ $(1\,020t-3r)$이다. t는 s, y와 r는 m단위로 주어졌다. 파장과 전파속도, r_1=1m, r_2=1.5m인 점들에서 진폭과 두 점의 자리각차를 구하여라.

(답. 0.67m, 340m/s, 2×10^{-4}m,
1.33×10^{-4}m, 1.5π)

8. 진폭이 A_1=4cm, 파장이 10cm인 파동과 진폭이 A_2=2cm, 파장이 10cm인 파동이 자리각차 π를 가지고 파원 A와 B에서 각각 퍼져나가고있다. A에서 60cm, B에서 10cm인 점 P와 A에서 50cm, B에서 15cm 떨어진 점 Q에서 중첩된 결과 어떤 진폭으로 진동하겠는가?

(답. 2cm, 6cm)

9. 두 간섭성파원 A, B로부터 P점까지의 거리는 각각 90cm, 60cm이고 거리차가 반파장의 5배라면 그 파동들의 파장은 얼마인가?

(답. 12cm)

10. 파장이 5cm, 진폭 2cm인 파동이 물면우의 15cm 떨어진 두 점 A, B로부터 같은 진동상태로 동시에 퍼지고있다.

ㄱ) A로부터 30cm, B로부터 37.5cm 떨어진 점 C에서 합성파의 진폭은 얼마인가?

ㄴ) A로부터 20cm, B로부터 30cm 떨어진 점 C′에서 합성파의 진폭은 얼마인가?

ㄷ) 선분 AB우에서 떨지 않는 점은 몇곳이나 되는가?

(답. ㄱ) 0 ㄴ) 4cm ㄷ) 6곳)

11. 60cm 떨어진 두 파원 A, B에서 자리각이 같고 진동수가 각각

100Hz인 파를 내보냈더니 AB사이에서 3개의 배가 생겼다. 파장과 전파속도를 구하여라. (답. 0.4m, 40m/s)

12. 소리가 공기에서 물로 퍼질 때 파장이 얼마나 변화되겠는가? 공기의 온도는 13℃이고 물속에서 소리의 전파속도는 1 440m/s 이다.

(답. 물속에서 4.24배 더 길어진다.)

13. 0℃인 암모니아속에서 소리의 전파속도는 414.4m/s이다. 두 끝을 막은 관안에 암모니아를 넣고 진동수 1 041Hz인 소리에 대하여 공명이 일어나게 하려면 관의 길이가 얼마여야 하는가?

(답. 약 20cm의 옹근수배 되는 길이)

14. 기차가 진동수 2 500Hz의 기적을 울리면서 v=20m/s의 속도로 접근해오고있다. 이때 바람이 u=10m/s의 속도로 기차와 같은 방향으로 불어온다면 기적소리는 어떤 진동수로 들리겠는가? 만일 바람이 기차와 반대방향으로 분다면 기적소리는 어떤 진동수로 들리겠는가? 소리의 전파속도는 340m/s로 보아라.

(답. 약 2 652Hz, 약 2 661Hz)

15. 방송차가 54km/h의 속도로 달리고있고 자전거를 탄 사람도 같은 도로로 18km/h의 속도로 달리고있다. 자전거가 방송차 앞에서 달릴 때와 방송차를 따라갈 때 방송차에서 나는 600Hz의 소리가 자전거를 탄 사람에게는 어떤 진동수로 들리겠는가? 소리의 전파속도는 340m/s로 보아라.

(답. 618.5Hz, 583.1Hz)

16. 그림 2-53과 같이 네거리에서 두 길로 구급차와 자전거선수가 교차점 O를 향하여 달리고있다. 구급차는 700Hz의 소리를 내면서 30m/s의 속도로, 자전거선수는 15m/s의 속도로 운동하고있다. 구급차(S)와 자전거(C)를 맺는 직선과 도로들이 이루는 각이 각각 60°, 30°인 순간에 자전거선수는 구급차가 내는 소리를 어떤 진동수로 듣겠는가? 공기속에서 소리의 전파속도는 340m/s이다.

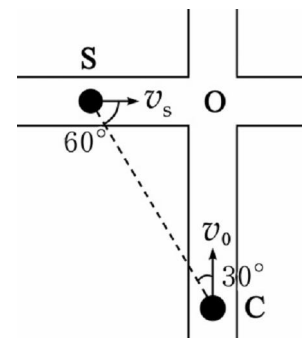



그림 2-53

(답. 760Hz)

제3장. 전기진동과 전자기파

전기진동은 매우 중요하다. 전자장치들은 전기진동에 의하여 동작한다. 또한 일부 전자장치들에서는 전기진동이 전자기파로 되여 공간으로 퍼져나가 먼곳에 있는 다른 전자장치들과 자료를 주고받을수 있게 해준다.

전기진동과 전자기파는 인민경제 여러 부문과 가정생활에 이르기까지 쓰이지 않는데가 없다.

이 장에서는 전파통신의 기초로 되는 전기진동과 교류회로에 흐르는 전류법칙, 교류전력과 전기절약방도, 전자기파의 발생과 성질에 대하여 학습한다.

제1절. 유효저항과 유도저항

유효저항

전기회로에서 직류가 흐를 때와 마찬가지로 교류가 흐를 때에도 저항 R는 교류전류의 흐름을 방해하며 쥴열을 발생시킨다. 때문에 교류회로에서 쥴열을 발생하는 저항 R를 **유효저항**이라고 부른다.

❓ 유효저항에서 교류의 전압과 전류사이에 어떤 관계가 있는가.

유효저항 R에 교류전압 $u_R = u_{0R}\sin\omega t$가 걸리면 옴의 법칙에 따라

$$i_R = \frac{u_R}{R} = \frac{u_{0R}}{R}\sin\omega t = i_{0R}\sin\omega t$$

로 표시되는 교류전류가 흐른다.(그림 3-1)

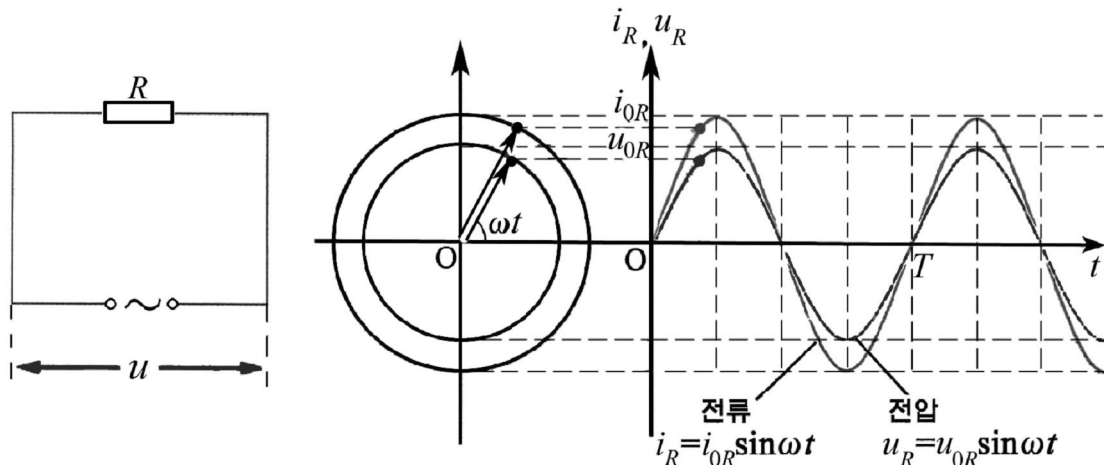



그림 3-1. 유효저항에서 전압과 전류는 자리각이 같다

이처럼 유효저항에서 전류의 자리각은 전압의 자리각과 같다.

유효저항에서 교류전압과 전류의 진폭 및 실효값들사이에 다음과 같은 관계가 있다.

$u_{0R} = i_{0R}R$	유효저항에서 전압과 전류의 진폭들사이의 관계
$U_R = I_R R$	유효저항에서 전압과 전류의 실효값들사이의 관계

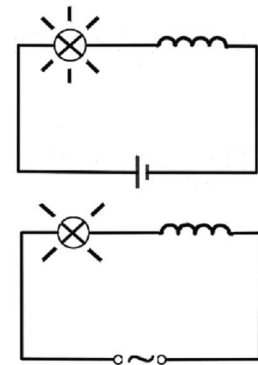
유도저항

교류가 흐를 때 선륜은 어떤 작용을 하겠는가.

그림 3-2와 같이 선륜과 전등을 직렬련결한 회로에 직류전압을 걸었을 때와 크기가 같은 교류전압을 걸었을 때 전등불의 밝기를 비교한다. 교류전압을 걸었을 때 밝기가 어둡다.

이것은 선륜이 직류에 대해서는 저항을 거의 나타내지 않지만 교류에 대해서는 큰 저항을 나타낸다는것을 보여준다.

그림 3-2. 선륜의 저항작용

선륜에 교류가 흐르면 자체유도전동력이 생겨 전류변화가 잘 일어나지 못하게 하므로 큰 저항이 나타난다.

선륜이 교류에 대하여 나타내는 저항을 **유도저항**이라고 부른다.

선륜의 유도저항의 크기는 무엇에 관계되는가.

선륜과 전등을 직렬로 련결하고 크기가 같으면서 주파수가 다른 교류전압을 걸어주면 주파수가 높은 교류에서 전등이 더 어둡다.

또한 이 회로에 주파수와 크기가 같은 교류전압을 걸어주고 선륜의 철심을 넣었다뺐다하면 철심이 있는 경우에 전등이 더 어둡다.

이것은 유도저항이 주파수와 자체유도결수에 비례한다는것을 보여준다. 이로부터 선륜의 유도저항 X_L은 다음과 같이 표시된다.

$X_L = \omega L = 2\pi\nu L$	유도저항

유도저항은 선륜의 유도결수가 클수록, 교류의 주파수가 높을수록 크다.

그러므로 직류는 선륜을 잘 통과하지만 교류는 잘 통과 못하며

주파수가 높은 교류일수록 유도저항은 더 커진다.

유도저항의 단위는 1Ω이다.

선륜에서 교류전압과 전류의 진폭과 실효값들사이에는 다음과 같은 관계가 있다.

$u_{0L} = i_{0L} L\omega$	유도저항에서 전압과 전류의 진폭들사이의 관계
$U_L = I_L L\omega$	유도저항에서 전압과 전류의 실효값들사이의 관계

❓ 선륜만 있는 교류회로에서 전압과 전류사이에 어떤 관계가 있는가.

리론적계산에 의하면 회로에 흐르는 교류전류가

$$i_L = i_{0L} \sin \omega t$$

로 표시될 때 선륜에 걸리는 전압은 다음식으로 표시된다.

$$u_L = u_{0L} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

그러므로 선륜에서 교류전압의 자리각은 전류보다 $\pi/2$만큼 앞선다.(그림 3-3)

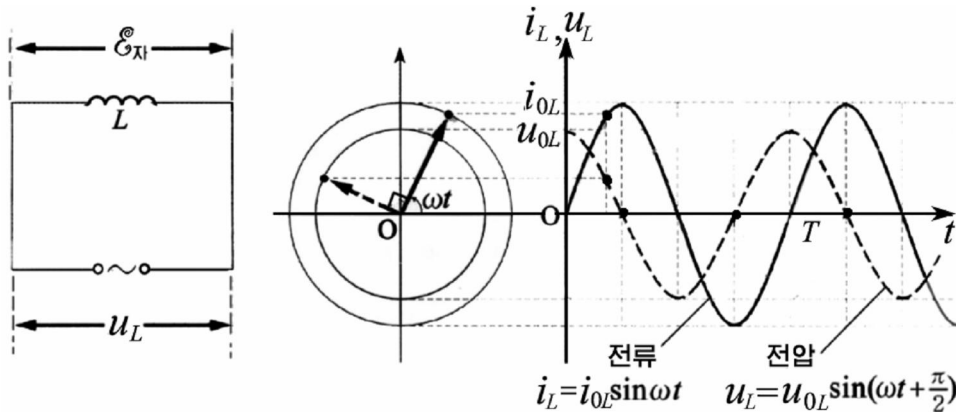



그림 3-3. 선륜에서 교류전압은 전류보다 자리각이 $\frac{\pi}{2}$만큼 앞선다

선륜이 유도저항을 가지는 현상은 기체방전등들에서 전류를 제한하는 한류기의 원리로 되고있으며 선륜이 주파수가 높은 교류에 대하여 더 큰 유도저항을 나타내는 현상은 색류선륜의 원리로 되고 있다.

각이한 주파수를 가진 교류들이 섞인데서 주파수가 높은 교류는 통과시키지 않고 주파수가 낮은 교류는 통과시키는 선륜을 **색류선륜**이라고 부른다.

[례제] 유도저항이 30Ω인 선륜에 I=0.2A의 교류전류가 흐른다. 선륜에 걸린 전압의 실효값과 진폭은 얼마인가?

풀이. 주어진것: X_L=30Ω

I=0.2A

구하는것: U?, u_0?

$$U = I X_L = 0.2\text{A} \times 30\Omega = 6\text{V}$$

$$u_0 = \sqrt{2}U = 1.4 \times 6\text{V} = 8.4\text{V}$$

답. 6V, 8.4V

문 제

1. 다음의 문장에서 틀린것을 찾고 그 근거를 밝혀라.
   ㄱ) 선륜에 직류전압을 걸면 선륜은 유효저항만을 가진다.
   ㄴ) 선륜은 직류에 대해서는 유도저항을 가지지 않는다.
   ㄷ) 교류회로에서 권회수가 작은 선륜은 유도저항도 작다.
   ㄹ) 선륜에 60Hz, 220V의 교류전압을 걸었을 때 유도저항은 60Hz, 22V의 교류전압을 걸었을 때보다 10배 크다.
   ㅁ) 선륜에 직류전류가 흐르는 전기간 유도저항은 언제나 령이다.
2. 유도저항의 단위가 1Ω이라는것을 밝혀라.
3. 어떤 선륜에 주파수가 300MHz인 교류가 흐를 때 생기는 유도저항은 주파수가 60Hz인 교류가 흐를 때보다 몇배나 더 큰가?

제2절. 용량저항과 무효저항

용량저항

축전기가 들어있는 전기회로에 전류가 흐를수 있겠는가.

실 험

○ 그림 3-4와 같이 축전기와 전등을 직렬로 이은 회로에 직류전압을 걸어주고 전등의 밝기를 관찰한다. 전등에 불이 켜지지 않는다.

○ 다음 그 회로에 교류전압을 걸어주고 전등의 밝기를 관찰한다. 전등불이 켜

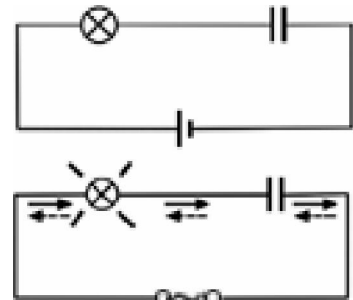



그림 3-4. 축전기로 흐르는 교류

져있다.

실험으로부터 직류는 축전기로 흐르지 않지만 교류는 축전기를 통해 흐른다는것을 알수 있다.

축전기로 교류가 어떻게 흐르는가.

축전기를 교류전원에 이으면 전압이 높아지는 동안은 전기줄로 전류가 흐르면서 극판들이 충전되고 전압이 낮아지는 동안은 방전되면서 반대방향의 전류가 전기줄로 흐른다.

이처럼 교류회로에서 축전기의 극판사이로 전기량들이 옮겨가는것이 아니라 충방전이 엇바뀌는 파정에 회로에 전류가 흐른다.

그러면 교류회로에서 축전기는 어떤 작용을 하겠는가.

축전기를 직렬로 련결한 전등과 련결하지 않은 전등에 같은 교류전압을 걸어주면 축전기가 련결된 전등이 더 어둡다. 이것은 축전기는 교류에 대하여 저항을 나타낸다는것을 보여준다.

축전기가 교류에 대하여 나타내는 저항을 **용량저항**이라고 부른다.

용량저항의 크기는 무엇에 관계되는가.

축전기를 직렬로 련결한 전등에 걸어준 교류의 주파수가 높을수록, 축전기의 전기용량이 클수록 전등이 더 밝다.

이것은 축전기의 용량저항은 주파수와 전기용량에 거꿀비례한다는것을 보여준다. 이로부터 축전기의 용량저항 X_C는 다음과 같이 표시된다.

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi\nu C}$$ 축전기의 용량저항

축전기의 용량저항은 전기용량이 클수록, 주파수가 높을수록 작다.

용량저항의 단위는 1Ω이다.

축전기에서 교류전압과 전류의 진폭과 실효값은 다음과 같은 관계에 있다.

$$u_{0C} = i_{0C} X_C = i_{0C} \frac{1}{\omega C}$$ 축전기에서 전압과 전류의 진폭사이 관계

$$U_C = I_C X_C = I_C \frac{1}{\omega C}$$ 축전기에서 전압과 전류의 실효값들사이 관계

생각하기 소형충전장치에서 축전기는 어떤 역할을 하는가.

축전기만 있는 교류회로에서 전압과 전류는 어떤 관계에 있는가.

리론적으로 살펴보면 축전기에 흐르는 교류전류가

$$i_C = i_{0C} \sin \omega t$$

로 표시될 때 축전기에 걸리는 전압은 다음과 같은 식으로 표시된다.

$$u_C = u_{0C} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

그러므로 축전기에서 교류전압의 자리각은 교류전류보다 $\pi/2$ 만큼 뒤떨어진다.(그림 3-5)

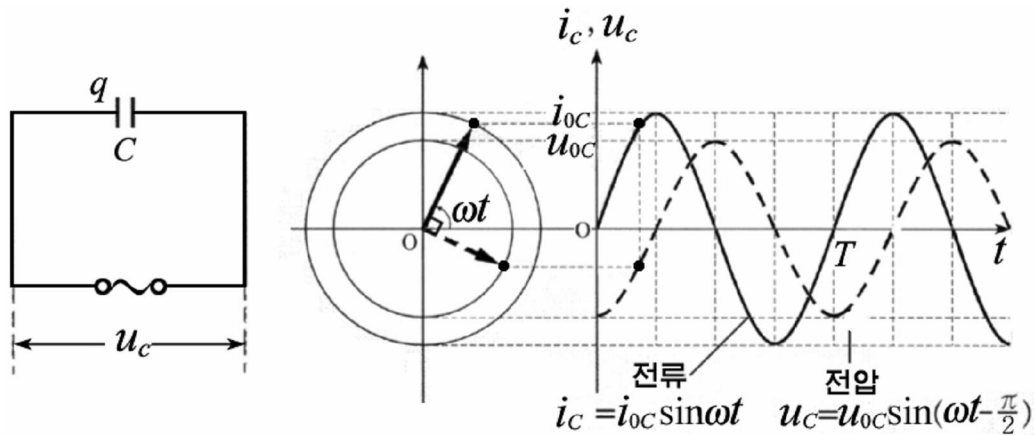



그림 3-5. 축전기에서 전압은 전류보다 자리각이 $\pi/2$만큼 뒤떨어진다

무효저항

교류회로에는 유효저항과 함께 유도저항과 용량저항이 들어있다. 유효저항은 쥴열을 발생시켜 전원으로부터 받은 전기에네르기를 소비한다. 그러나 유도저항과 용량저항은 회로에 교류전류가 흐를 때 쥴열을 발생시키지 않는다.

이런 의미에서 교류회로에서는 유도저항과 용량저항을 **무효저항**이라고 부른다.

교류회로에 선륜만 있을 때 무효저항은 유도저항이고 축전기만 있을 때 무효저항은 용량저항이다.

축전기와 선륜이 직렬로 련결된 회로에 교류전압을 걸어주면 $i = i_0 \sin \omega t$ 인 전류가 두 요소에 꼭같이 흐른다. 그런데 이 전류보다 전압이 축전기에서는 $\pi/2$만큼 뒤떨어지고 선륜에서는 $\pi/2$만큼 앞선다.

전압과 전류의 진폭을 벡토르로 생각하고 이 벡토르들의 첫 점을 일치시키면 그림 3-6과 같다.

그림에서 보면 선륜에 걸리는 전압과 축전기에 걸리는 전압은 방향이 반대이며 따라서 전체 전압 u_0 은 이 두 전압의 차 $u_{0L}-u_{0C}$ 와 같다.

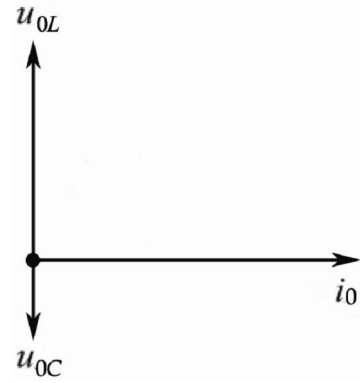



그림 3-6. *L*, *C*에서 전압, 전류들의 자리각차

$$u_0 = u_{0L} - u_{0C} = i_0 \omega L - \frac{i_0}{\omega C} = i_0 \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)$$

그런데 ωL 은 유도저항이고 $1/\omega C$ 은 용량저항이므로 선륜과 축전기가 직렬련결된 회로에서 무효저항은 이것들의 차와 같다. 즉

$X = \lvert X_L - X_C \rvert = \left\lvert \omega L - \frac{1}{\omega C} \right\rvert$	무효저항의 크기

[례제] 전기용량이 1 000pF인 축전기에 6×10^3 kHz의 교류전압을 걸어주었을 때 축전기의 용량저항은 얼마인가?

풀이. 주어진것 : $\nu = 6\times10^3\ \text{kHz} = 6\times10^6\ \text{Hz}$

$C = 10^3\ \text{pF} = 10^{-9}\ \text{F}$

구하는것 : X_C ?

$$X_C = \frac{1}{2\pi\nu C} = \frac{1}{2\times3.14\times6\times10^6\times10^{-9}} \approx 26(\Omega)$$

답. 약 26Ω

문제

1. 다음의 □안에 알맞는 말을 써넣어라.

축전기와 □을 병렬로 잇고 직류와 고주파교류가 함께 흐르게 할 때 □는 축전기로 잘 흐르고 □는 선륜으로 잘 흐른다. 그것은 □에 대한 축전기의 □이 작고 선륜의 □이 크며 □에 대한 축전기의 □이 크고 선륜의 □은 령이기때문이다.

2. 축전기의 용량저항의 단위가 1Ω과 같다는것을 밝혀라.

3. 전기용량이 10μF인 축전기가 전압이 220V이고 주파수가 60Hz인 전원에 련결되였다. 전류의 실효값과 최대값을 구하여라.

제3절. 교류회로의 옴의 법칙

교류회로의 옴의 법칙

교류회로는 일반적으로 유효저항 R, 선륜 L, 축전기 C를 가지며 이 요소들은 일정한 저항값을 가진다.

교류회로에서 전압, 전류, 저항들사이에 어떤 관계가 있는가.

그림 3-7과 같이 R, L, C를 직렬로 련결하고 여기에 각주파수가 ω인 교류전압을 걸어주면 직렬로 련결되였으므로 R, L, C들에는 전원전압과 같은 주파수의 교류전류 $i = i_0 \sin \omega t$ 가 꼭같이 흐른다.

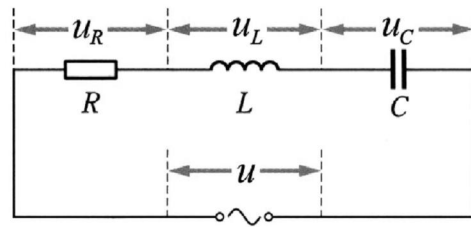



그림 3-7. R, L, C 직렬회로

전체 전압 u를 구해보자.

매 요소들에 걸리는 전압 u_R, u_L, u_C 들을 보면 u_R 는 i 와 자리각이 같지만 u_L, u_C 들은 i 와 자리각이 다르다.(그림 3-8)

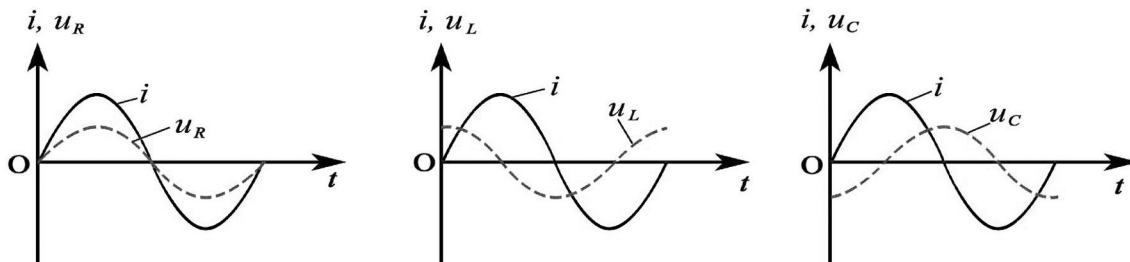



그림 3-8. R, L, C 에서 전압과 전류의 자리각

R, X_L, X_C 의 크기가 다르므로 u_R, u_L, u_C 들의 진폭도 다르다. 즉

$$u_R = u_{0R} \sin \omega t = i_0 R \sin \omega t$$

$$u_L = u_{0L} \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) = i_0 \omega L \sin\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right)$$

$$u_C = u_{0C} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) = i_0 \frac{1}{\omega C} \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right)$$

여기서는 직렬회로이므로 $i_0 = i_{0R} = i_{0L} = i_{0C}$ 임을 고려하였다.

u_R, u_L, u_C 들을 그것들의 진폭을 크기로 하는 벡토르들로 표시하면 전체 전압은 이 벡토르들의 합으로 구할수 있다. 이 벡토르들의 첫 점을 일치시키면 그림 3-9와 같다. 그림으로부터

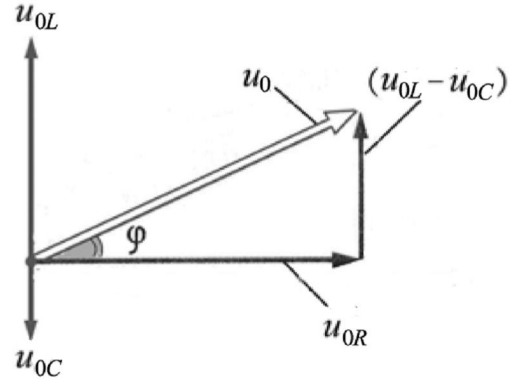



그림 3-9. 전압벡토르들의 합성

$$u_0^2 = u_{0R}^2 + (u_{0L} - u_{0C})^2 = i_0^2 \left[R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2 \right]$$

따라서

$$u_0 = i_0 \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}$$

여기로부터 다음의 식을 얻는다.

$$i_0 = \frac{u_0}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2}} = \frac{u_0}{Z} \tag{1}$$

이 식에서

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C} \right)^2} = \sqrt{R^2 + X^2} \quad \text{완전저항} \tag{2}$$

를 R, L, C가 직렬련결된 교류회로의 **완전저항**이라고 부른다.

식 1을 실효값들로 표시하면 다음과 같다.

$$I = \frac{U}{Z} \quad \text{교류회로의 옴의 법칙} \tag{3}$$

식 3으로부터 교류회로에서 전류의 세기는 전압에 비례하고 완전저항에는 거꿀비례한다. 이것을 **교류회로의 옴의 법칙**이라고 부른다.

R, L, C 직렬회로에서 전압과 전류의 자리각차

그림 3-9에서 보면 회로의 전체 전압과 전류사이에 자리각차

φ가 있다는것을 알수 있다. 이것은 무효저항때문이다.

R, L , C 직렬회로에서 교류전압은 전류보다 자리각이 φ만큼 앞선다. 즉

$$i = i_0 \sin \omega t$$
$$u = u_0 \sin(\omega t + \varphi)$$

만일 교류회로에 축전기를 련결하여 용량저항이 유도저항보다 크게 하면 교류전압이 전류보다 φ만큼 뒤떨어진다.

교류회로에서 용량저항과 유도저항이 같아서 무효저항이 령이면 전압과 전류의 자리각차는 령이다. 즉

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \rightarrow X = 0$$

인 경우 교류회로에 순수 유효저항만 있는 경우와 같아진다.

문제

1. 다음의 문장들에서 옳은것을 찾고 그 근거를 밝혀라.
   ㄱ) R, L, C가 들어있는 회로에서 전류의 세기는 $I = U / R$ 로 계산될수 없다.
   ㄴ) R, L, C가 직렬련결된 회로에서 매 부분에 걸리는 전압은 회로전체에 걸린 전압보다 클수 있다.
   ㄷ) 무효저항이 있는 교류회로에서 전류와 전압의 자리각차는 령이 될수 있다.
   ㄹ) R, L, C를 직렬로 이은 교류회로에서 완전저항은 유효저항보다 언제나 크다.
2. L=2.5H, R=5Ω인 선륜과 C=4μF인 축전기를 직렬련결한 회로에 주파수가 50Hz인 5V의 교류전압이 걸린다. 이 회로에 흐르는 전류의 세기는 얼마인가?
3. 선륜에 10V의 직류전원을 이었을 때에는 10mA의 전류가 흐르고 60Hz, 10V의 교류전원을 이었을 때에는 5mA의 전류가 흐른다. 이 선륜의 유도결수를 구하여라.

제4절. 교류의 전력

교류의 전력에는 무효전력, 유효전력, 피상전력들이 있다.

무효전력

무효저항들에서 직접 소비되지는 않고 자기마당이나 전기마당의 에네르기로 넘어가는 교류전력을 **무효전력**이라고 부른다. Q로 표시한다.

무효전력은 전류의 실효값 I와 무효저항에 걸리는 전압의 실효값 U_X의 적으로 결정된다.

$$Q = U_X I = I^2 X \quad \text{무효전력} \tag{1}$$

무효전력의 단위는 1VAr(바르)이다.

이보다 1 000배 큰 단위로 1kVAr(크바르)를 쓴다.

무효전력은 어떤 특성을 가지는가.

선륜에 교류전류가 흐르면 +반주기에서 전류가 증가하는 $T/4$동안은 전기에네르기가 자기마당의 에네르기로 저축된다. 그다음 $T/4$동안은 전류가 감소하는데 따라 저축되였던 자기마당의 에네르기가 유도전류로 넘어가며 이 유도전류는 전원에로 간다.

교류의 －반주기에서도 마찬가지이다. 그리하여 선륜에서 무효전력은 전원주파수의 2배로 변한다.(그림 3-10)

축전기에 교류가 흐를 때에도 마찬가지이다.(그림 3-11)

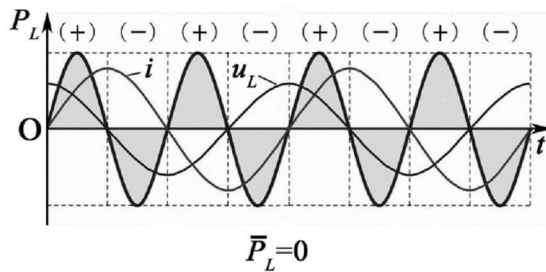



그림 3-10. 유도저항에서의 전력

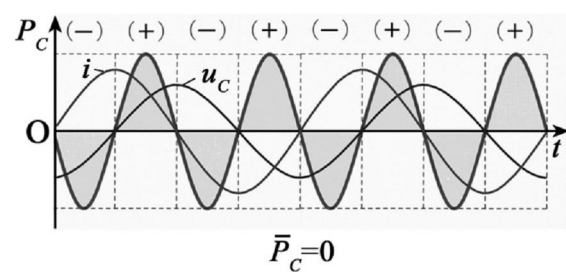



그림 3-11. 용량저항에서의 전력

이처럼 <u>무효전력은 소비되지 않고 전원과 무효저항사이에서 전원주파수의 2배의 주파수로 오고가기만 한다.</u>

무효전력은 전동기, 변압기, 유도로 등이 동작하는데 필요한 자기마당을 만들어주기때문에 없어서는 안될 전력이다.

유효전력과 피상전력

❓ 유효저항과 무효저항이 함께 있는 교류회로에서 전력은 어떻게 되는가.

교류회로에 전동기가 있는 경우를 보자. 전동기에는 선륜의 유도도에 의한 무효저항과 함께 선륜의 유효저항이 있다. 이것으로 하여 전동기에서 전압은 전류보다 자리각이 φ만큼 앞선다.

전동기에 교류전압을 걸어주면 공급되는 교류전력의 일부는 무효전력으로 되여 자기마당을 만들어주고 일부는 회전자를 돌려주는 일을 한다. 또한 일부 전력은 쥴열을 발생시킨다.

이처럼 교류회로에서 력학적일이나 열로 소비되는 전력을 **유효전력**이라고 부른다.

계산에 의하면 유효전력 P는 다음과 같다.

$$P = I^2R = U_RI = UI\cos\varphi \quad \text{유효전력} \qquad (2)$$

여기서 U, I는 각각 교류전압과 전류의 실효값이다.

유효전력의 단위는 1W이다.

유효전력은 교류전압과 전류가 같아도 그것들사이의 자리각차 φ가 다르면 다르다.

식 2에서 교류전압과 전류의 실효값들의 적으로 표시되는 량을 **피상전력**이라고 부른다.

피상전력을 S로 표시하면 다음과 같다.

$$S = UI = I^2Z \quad \text{피상전력}$$

피상전력은 전원에서 교류회로에 공급하는 전력이다.

피상전력의 일부는 무효전력으로, 나머지는 유효전력으로 된다.

무효전력에 의해 일할 조건이 마련된 전기기계는 유효전력만 한 전력을 소비한다.

피상전력의 단위는 1VA(바)이다. 이보다 1 000배 큰 단위로 1kVA(크바)를 쓴다. 발전기, 변압기, 전동기의 정격전력은 1kVA로 표시한다.

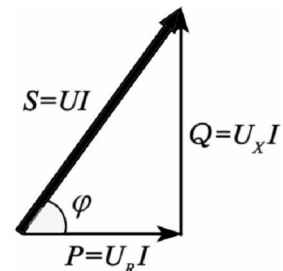



그림 3-12. 전력3각형

피상전력, 유효전력, 무효전력사이에는 다음의 관계가 있다.(그림 3-12)

$$S^2 = P^2 + Q^2 \qquad (3)$$

력률

공급된 전력가운데서 유효전력이 얼마인가를 표시하는 비률을 나타내는 값(유효전력을 피상전력으로 나눈 값)

$\cos\varphi = \dfrac{P}{S}$	력 률

을 **력률**이라고 부른다. 력률은 0～1의 값을 가진다.

력률이 낮으면 발전기와 부하사이에서 오가는 전류가 커지고 이 전류에 의한 전기줄에서의 쥴열발생이 커진다.

전력의 도중손실을 줄이자면 반드시 력률을 0.95이상 되게 높여주어야 한다.

력률을 높이자면 전동기, 변압기의 곁에 용량이 큰 축전기를 병렬로 련결하여 전기줄에 흐르는 교류전류와 전압의 자리각차를 줄여야 한다.

력률을 높이자면 또한 전기기계들을 무부하 또는 경부하(정격전력보다 작은 부하)에서 운전하지 말아야 한다.

문제

1. 다음의 문장에서 틀린것을 찾고 그 근거를 밝혀라.
   ㄱ) 무효전력은 교류회로에서 소비되지 않고 전원으로 되돌아가므로 랑비되지 않는다.
   ㄴ) 교류전동기에서 무효전력을 작게 하면 유효전력이 커지며 피상전력은 변하지 않는다.
   ㄷ) 력률이 1이면 그 회로에는 유도저항과 용량저항이 없다.
   ㄹ) 교류전력은 매 시각 달라지므로 유효전력과 무효전력, 피상전력도 매 시각 달라진다.
2. 회로의 R, L, C가 각각 어떻게 될 때 력률이 1로 되겠는가?
3. 양수기용전동기에는 정격값들이 U=220V, I=100A, $\cos\varphi$ = 0.8로 기록되여있다. 정격전압으로 동작할 때 전원으로부터 받는 피상전력, 유효전력 및 무효전력은 얼마인가?

제5절. 전기진동과 공진

전기진동

전기용량이 C인 축전기와 유도결수가 L인 선륜으로 이루어진 전기회로에서 전기적량들의 변화과정을 실험으로 알아보자.

실 험

○ 축전기 C와 선륜 L을 그림 3-13과 같이 련결하고 스위치 K를 A쪽에 넣어 축전기를 충전시킨다.

○ 다음 스위치 K를 B쪽으로 옮겨 선륜을 통하여 방전시키면서 오씰로그라프의 형광막을 살펴본다. 오씰로그라프의 형광막에 진동그라프가 나타난다.

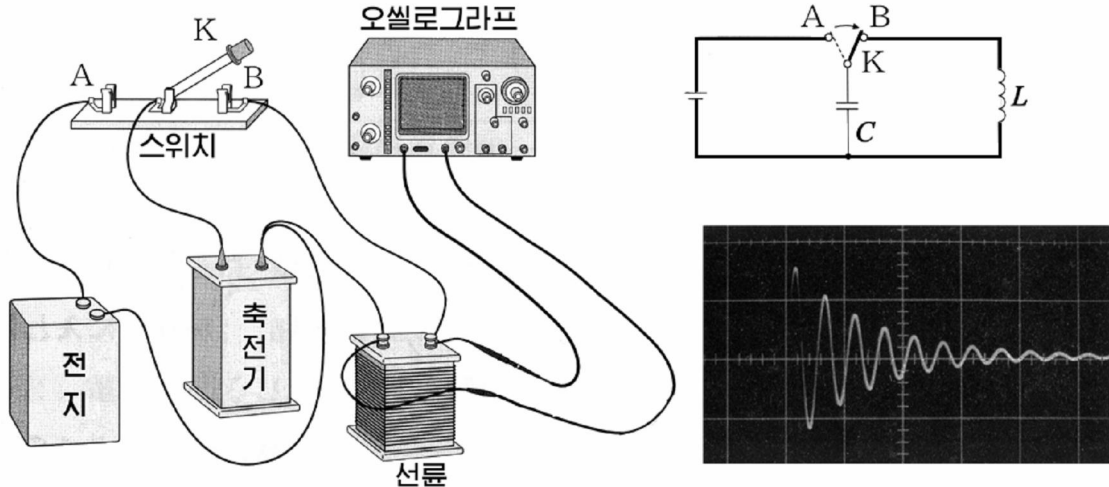



그림 3-13. 전기진동

여기로부터 무엇을 알수 있는가.

축전기의 두 극판(또는 선륜의 두 단자)에 걸리는 전압의 크기와 방향이 주기적으로 변한다는것을 알수 있다.

또한 축전기의 전기량이 전압에 비례하므로($q=CU$) 축전기의 전기량과 극판사이의 전기마당, 선륜에 흐르는 전류와 선륜주위에 생기는 자기마당도 주기적으로 변한다는것을 알수 있다.

이처럼 축전기 C와 선륜 L을 포함한 닫긴회로에서 일어나는 전기적량들의 주기적인 변화를 **전기진동**이라고 부른다.

❓ 전기진동은 어떻게 일어나는가.

앞그림의 회로에서 스위치를 B에 옮겨놓는 시각을 $t=0$으로 하고 이때 축전기에 걸린 전압을 u_0, 축전기에 쌓인 전기량을 q_0

이라고 하자.(그림 3-14의 ㄱ)

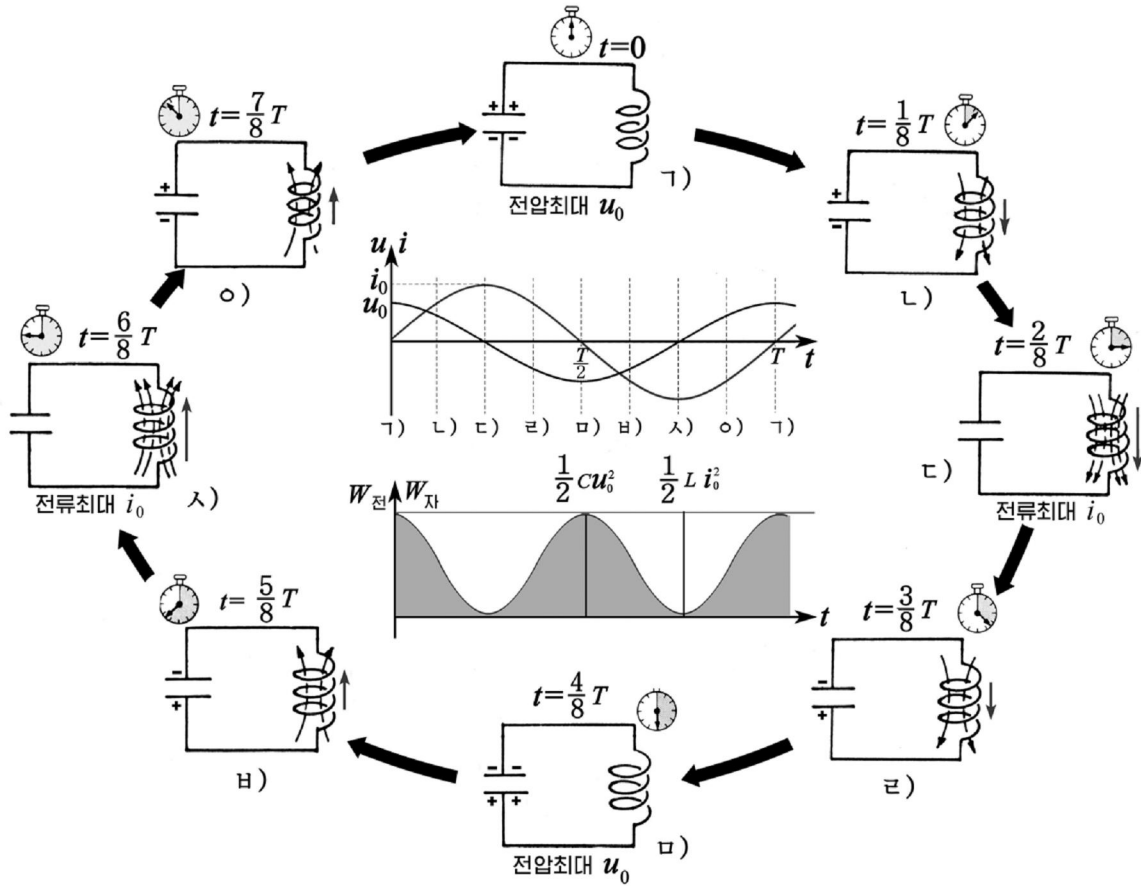



그림 3-14. 전기진동과정

다음순간부터 축전기의 전기량이 방전하면서 선륜 L을 통하여 전류가 흐른다.(그림 ㄴ) 이때 선륜 L에 전류의 증가를 방해하는 유도전동력이 생기므로 전류는 천천히 커진다.

전기량이 전부 방전하면 전기량 q와 전압 u는 령으로 되며 전류 i는 최대값 i_0에 이른다.(그림 ㄷ)

그 다음순간부터 전류가 감소하는데 이에 따라 선륜 L에 전류의 감소를 방해하는 유도전동력이 생기므로 전류는 같은 방향으로 계속 흐르면서 천천히 줄어든다.(그림 ㄹ) 이 전류는 축전기를 처음과 반대의 부호로 충전시킨다.

전류가 령에 이를 때 충전이 끝나고 전기량 q와 전압 u는 반대부호의 최대값 $-q_0$과 $-u_0$에 이르게 된다.(그림 ㅁ)

다음에는 축전기가 다시 방전(그림 ㅂ, ㅅ)되였다가 충전(그림 ㅇ)되면서 처음상태로 돌아간다. 이러한 과정이 주기적으로 반복되면서 전기진동이 일어난다.

그림에서 보는것처럼 전기진동과정에 축전기극판사이에 생기는 전기마당과 선륜에 생기는 자기마당도 주기적으로 변한다.

력학적진동과 마찬가지로 전기진동에도 자유전기진동과 강제전기진동이 있다.

생각하기 그림 3-13에서 전기진동의 진폭이 왜 점차 줄어드는가?

축전기가 한번 충전된 후에 저절로 일어나는 전기진동을 **자유전기진동**이라고 부른다.

만일 LC전기진동회로에 저항 R가 없으면 축전기의 전기마당에네르기와 선륜의 자기마당에네르기가 서로 전환되면서 전기진동이 끊임없이 일어나는데 이런 진동을 **고유전기진동**이라고 부른다.

고유전기진동의 각주파수 ω_0, 고유전기진동주기 T_0, 고유전기진동주파수 ν_0은 각각 다음과 같다.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad T_0 = 2\pi\sqrt{LC}, \quad \nu_0 = \frac{1}{T_0} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

LC전기진동회로에 교류전압을 걸어주었을 때 일어나는 전기진동을 **강제전기진동**이라고 부른다. 따라서 강제전기진동은 진동회로에 걸어준 교류전압의 주파수 즉 강제전기진동주파수로 일어난다.

전기공진

강제전기진동에서도 력학적공진과 같은 현상이 나타나는가를 실험으로 알아보자.

실 험

○ 그림 3-15와 같이 축전기와 선륜으로 이루어진 전기진동회로를 전등을 거쳐 교류전원에 련결한다.

○ 교류전원의 주파수를 점차 높이면서 전등의 밝기를 살펴본다. 전등은 점점 밝아지다가 어떤 주파수에서 최대로

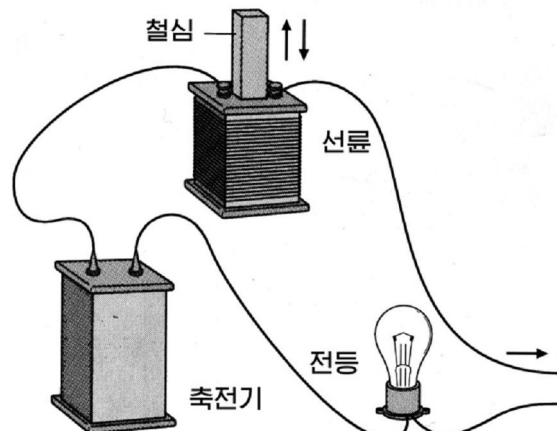



그림 3-15. 전기공진실험

되고 다시 점점 어두워진다. 전등이 제일 밝아질 때 교류전원의 주파수와 전기진동회로의 고유주파수를 비교하여보면 같다.

○ 전원의 주파수를 일정하게 고정하고 선륜에 철심을 넣어 유도결수를 변화시키면서 전등의 밝기를 살펴본다. 전등이 제일 밝을 때 회로의 고유주파수와 교류전원의 주파수를 비교하여보면 같다.

실험으로부터 교류전원의 주파수와 전기진동회로의 고유주파수가 같아질 때 전류의 세기가 최대로 된다는것을 알수 있다.(그림 3-16)

그림 3-16. 교류전원의 각주파수에 따르는 전류의 세기변화

이처럼 진동회로에 련결한 전원의 주파수와 전기진동회로의 고유주파수가 같아질 때 전류의 세기가 최대로 되는 현상을 **전기공진**이라고 부른다.

이로부터 전기공진조건은 다음과 같다.

$$\omega_{공} = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{전기공진조건}$$

공진이 일어날 때 선륜 또는 축전기에 걸리는 전압은 외부에서 걸어준 교류전압의 수십~수백배에 달한다. 이 현상은 무수히 많은 교류신호들가운데서 특히 무수히 많은 방송신호들가운데서 필요한 주파수를 가진 교류신호만을 골라내는데 널리 리용된다.

[례제] 고유전기진동이 일어날 때 고유주파수가 $\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 로 표시된다는것을 밝히여라.

풀이. 선륜으로 흐르는 전류의 최대값은 $i_0 = \frac{u_0}{X_L} = \frac{u_0}{\omega L}$

u_0은 축전기에 충전된 전압의 최대값과 같다고 볼수 있으므로

$$u_0 = i_0 X_C = \frac{i_0}{\omega C}$$

두 식을 고려하면 $\omega^2 = \frac{1}{LC}$ 이고 $\omega = 2\pi\nu$ 이므로 $\nu = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$

문 제

1. 다음의 문장에서 틀린것을 지적하고 그 근거를 밝혀라.
   ㄱ) 전기공진이 일어날 때 완전저항은 령이다.
   ㄴ) 전기공진이 일어날 때 무효저항은 령이다.
   ㄷ) 전기공진이 일어날 때 유효저항은 령이다.
   ㄹ) 회로에 유효저항이 언제나 존재하므로 전기공진은 일어날 수 없다.
2. LC회로에서 전기공진이 일어날 때 유효저항이 있으면 전기진동은 어떻게 되겠는가? 진동에네르기는 무엇으로 전환되는가?
3. $L = 130\mu\text{H}$, $\nu = 819\text{kHz}$ 인 방송을 고르려면 C가 어떤 값을 가져야 하는가?

제6절. 전자기마당과 전자기파

변위전류

축전기에 직류전압을 걸어주면 전류가 흐르지 않지만 교류전압을 걸어주면 전류가 흐른다. 이것은 교류의 ＋반주기동안에 축전기가 충전되고 －반주기동안에는 축전기가 전원을 통하여 방전되기때문이다.

축전기로 교류전류가 흐르는 현상을 좀 다른 각도에서 볼수 있다.

축전기가 련결된 회로로 교류전류가 흐르는것은 축전기극판사이에서도 그 어떤 《전류》가 흐르기때문이라고 생각할수 있다. 영국의 물리학자 막스웰은 축전기극판사이로 흐르는 《전류》를 변위전류라고 불렀다.

? 변위전류의 본성은 무엇인가.

도체에서 전류는 전자와 같은 전기나르개의 이동에 의해 흐른다.

축전기극판사이에는 도체가 없다. 때문에 변위전류는 전기나르

개들의 이동에 의한것이 아니다.

축전기에 교류전압을 걸어줄 때 극판사이에서는 전기마당이 시간에 따라 변하는 현상만이 있다. 그러므로 축전기극판사이에 존재하는 변하는 전기마당이 전류의 본성을 가진다고 말할수 있다.

즉 변하는 전기마당이 **변위전류**이다. 축전기극판사이에서뿐아니라 공간에서도 변하는 전기마당이 있으면 변위전류가 흐른다.

❓ 변위전류와 도체에 흐르는 전류의 공통점은 무엇인가.

다같이 주위에 자기마당을 만드는것이다.

변위전류가 주위에 자기마당을 만드는것은 다음의 실험으로 확인할수 있다.

교류가 흐르는 축전기의 두 극판사이에 도선면이 극판에 수직이 되게 닫긴도선을 넣고 검류계를 련결하면 바늘이 움직인다. 이것은 닫긴도선에 유도전류가 흐른다는것을 보여준다. 바로 이 유도전류는 변하는 전기마당 즉 변위전류에 의해 생겨난 변하는 자기마당에 의한것이다.

이처럼 공간에서 전기마당의 세기가 시간에 따라 변하면 변위전류가 흐르며 이 변위전류에 의해 변하는 자기마당이 생긴다.

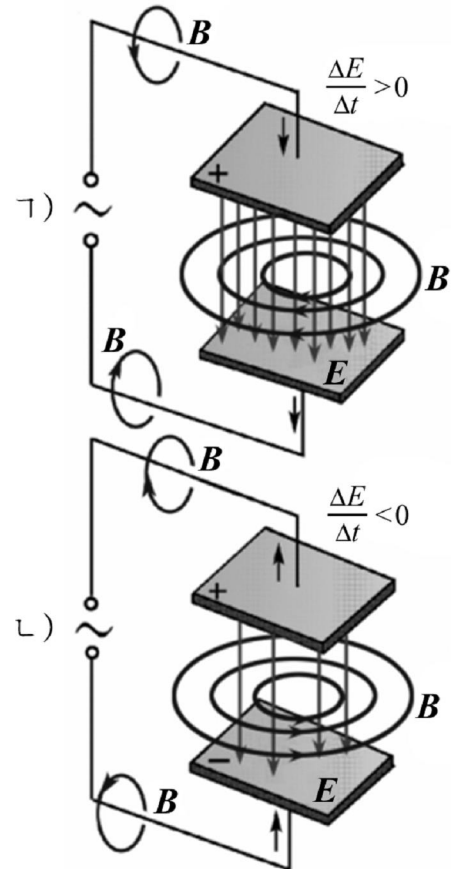
그림 3-17. 변하는 전기마당은 변하는 자기마당을 만든다

전자기마당

변하는 전기마당은 변하는 자기마당을 만든다.

도체에 변하는 전기마당(즉 교류전압)을 걸어주면 변위전류가 흐르면서 둘레에 변하는 자기마당을 만든다. 도선이 없는 공간에서도 변위전류로 하여 공간의 어떤 점에서 전기마당이 변하면 둘레에 변하는 자기마당이 생긴다.(그림 3-17)

한편 변하는 자기마당은 변하는 전기마당을 만든다.

변하는 자기마당속에 놓여있는

도체속에는 회리전류가 흐른다. 이것은 회리모양의 전기마당이 자유전자에 작용하기때문이다. 결국 변하는 자기마당은 회리전기마당을 만든다. 회리전기마당의 전력선은 정전기마당의 전력선과 달리 닫긴다.(그림 3-18)

❓ 변하는 전기마당과 변하는 자기마당이 어떻게 련관되는가.

우의 사실들을 종합하면 변하는 전기마당이 있는 곳에는 동시에 변하는 자기마당이 있다. 또한 변하는 자기마당이 있는 곳에는 동시에 변하는 전기마당이 있다. 그러므로 이 두가지 종류의 마당들은 서로 분리할수 없는 하나의 통일체를 이룬다.

그림 3-18. 회리전기마당의 발생

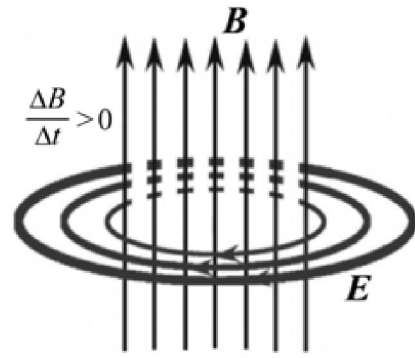
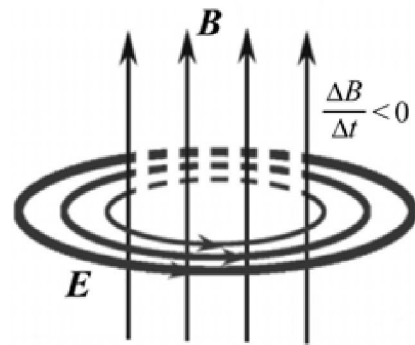
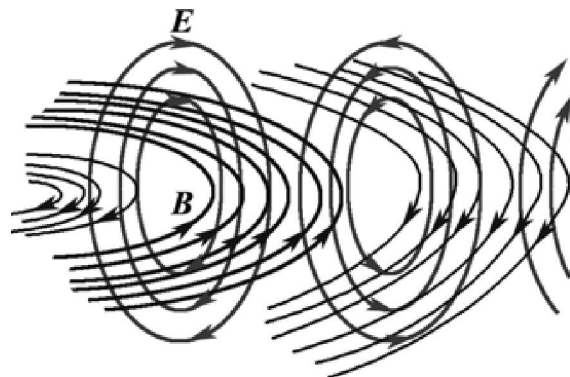
시간에 따라 변하는 전기마당과 자기마당이 하나로 통일되여있는 마당을 **전자기마당**이라고 부른다.

전자기파

전자기마당의 특징은 한자리에 머물러있지 않고 공간으로 퍼져나가는것이다. 어떤 자리에서 전기마당이 변하면 주위에 변하는 자기마당이 생기고 또 그 주위에 변하는 전기마당이 생기는 식으로 전자기마당이 공간으로 퍼져나간다. 이것은 전기마당과 자기마당의 진동이 공간으로 퍼져나가는 것으로서 파동으로 된다.

이처럼 공간으로 퍼져나가는 전자기마당을 **전자기파**라고 부른다.(그림 3-19)

그림 3-19. 전자기마당의 전파

막스웰은 전자기파의 존재를 예견하였을뿐아니라 전자기파는

진공속에서

$$c=\frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}\approx 3\times 10^8\,\mathrm{m/s}$$

의 속도로 퍼지며 공간의 매 점에서 전기마당의 세기와 자기유도사이에

$$E=cB$$

의 관계가 있다는것을 밝혔다.

빛도 전자기파의 하나이다.

[례제] 대전립자들이 가속운동을 할 때 그 주위에 전자기마당이 생긴다. 왜 그런가?

풀이. 등속운동하는 대전립자들은 전류를 이루며 주위에 정전기마당과 함께 정자기마당(시간에 따라 변하지 않는 자기마당)을 만든다. 그런데 대전립자들이 가속되면 전류도 시간에 따라 변하므로 주위에 생긴 자기마당이 변한다.

이 자기마당의 변화에 의하여 회리전기마당이 생긴다. 이 회리전기마당도 시간에 따라 변하므로 주위에 회리자기마당을 만든다.

이렇게 대전립자들이 가속운동을 하면 전자기마당이 생겨 그 주위에 퍼진다. 대전립자들의 가속도가 클수록 전자기마당이 세다.

문제

1. 변하는 전류가 흐르는 선륜주위에 전기마당이 어떻게 생기는가?
2. 직선전류가 만드는 회리자기마당과 변하는 전기마당이 만드는 회리자기마당은 어떻게 다른가 ?
3. 변위전류의 방향은 어떻게 결정하는가? 그림 3-17을 보고 설명하여라.

제7절. 전자기파의 복사

방송국에는 높은 탑우에 안테나들이 있고 무선기에도 안테나가 있다. 이 안테나에서 무엇이 나오는가를 보자.

전자기파의 복사조건

전자기파가 전기진동회로로부터 공간으로 퍼져나가는것을 **전자기파의 복사**라고 부른다.

❓ 진동회로에 교류가 흐르면 언제나 전자기파가 공간으로 퍼지는가.

전자기파가 전기진동회로로부터 공간으로 복사되자면 일정한 조건이 있어야 한다.

전자기파가 복사되자면 우선 전기진동회로가 열려야 한다.

선륜과 축전기로 된 진동회로에서 전기진동이 일어나면 전자기마당이 선륜과 축전기의 내부에 집중되여있어 밖으로 퍼져나오지 못한다. 이런 진동회로를 **닫긴진동회로**라고 부른다.(그림 3-20)

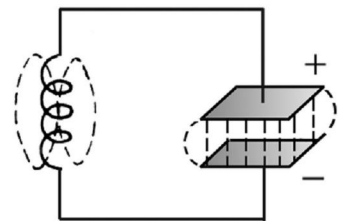



그림 3-20. 닫긴진동회로

축전기의 극판면적을 줄이면서 극판사이의 거리를 늘이도록 선륜을 펴놓으면 내부에 집중되여있던 전자기마당이 공간으로 퍼진다.(그림 3-21)

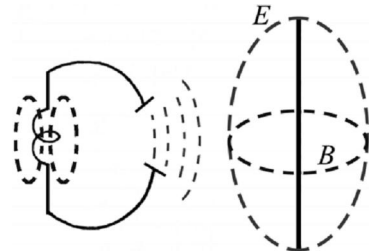



그림 3-21. 열린진동회로

이런 전기진동회로를 **열린진동회로** 또는 **안테나**라고 부른다.

전자기파가 잘 복사되자면 또한 전기진동주파수가 충분히 커야 한다.

열린진동회로에서 주파수가 높을수록 자기마당이 빨리 변하고 변하는 전기마당이 세진다.(전자기유도현상을 생각하여라.) 그리고 변하는 전기마당이 셀수록 변위전류가 커서 변하는 자기마당이 세진다. 그러므로 전기진동주파수가 높아야 열린진동회로에서 센 전자기마당이 생겨 전자기파가 멀리까지 퍼져간다.

LC진동회로의 주파수가 높으려면 $\nu_0 = \dfrac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ 로부터 전기용

량과 유도도가 작아야 한다. 안테나에서는 L과 C가 작아서 고유진동수 ν_0이 크다. 그리하여 안테나에서 전자기파가 잘 복사된다.

전자기파를 복사하는 안테나를 **송신안테나**, 전자기파를 수신하는 안테나를 **수신안테나**라고 부른다. (그림 3-22)

그림 3-22. 여러가지 안테나

전자기파를 계속 복사하려면 또한 안테나에 에네르기를 계속 보태주어야 한다. 전자기파를 복사하면 안테나의 진동에네르기가 그만큼 작아진다. 그러므로 전자기파를 계속 복사하려면 외부로부터 안테나에 전기진동에네르기를 계속 공급해주어야 한다.

안테나에서 전자기파의 복사

고주파발진기를 안테나와 이어놓고 발진주파수를 안테나의 고유주파수와 같게 조절해놓으면 안테나에서는 전기공진이 일어나 센 고주파전류가 흐르면서 전자기파가 복사된다. (그림 3-23)

그림 3-23. 고주파발진기에 이은 안테나

안테나의 두끝사이에서 전기마당의 세기가 변하면 변위전류가 흐르며 그 주위에 안테나에 수직으로 시간에 따라 변하는 닫긴 자력선들이 생긴다. (그림 3-24)

그림 3-24. 안테나둘레에서 전력선과 자력선의 분포

그리고 이 닫긴 자력선들둘레에는 자력선면에 수직으로 시간에 따라 변하는 닫긴 전력선이 생겨나면서 안테나로부터 전자기파가 퍼져간다.

[례제] 안테나의 유도도 L과 용량 C가 왜 작은가?

풀이. 닫긴전기진동회로에서 선륜

을 펴놓아서 한개의 직선도선으로 만들어주고 축전기극판을 벌려서 극판사이거리를 늘이는것과 함께 극판면적도 늘여놓으면 안테나로 된다.(그림 3-21)

선륜도 자기마당을 만들고 직선도선도 자기마당을 만든다는것을 생각하면 직선도선도 유도도를 가진다는것을 알수 있다. 선륜의 권회수가 작아질수록 유도도가 작아지므로 직선도선을 권회수가 극히 작은 선륜처럼 생각하면 직선도선은 매우 작은 유도도를 가진다.

한편 안테나에서 두 끌점을 극판으로 하고 안테나의 길이를 극판사이의 거리로 하는 축전기를 생각하면 극판사이거리가 길고 극판면적이 작으므로 용량이 매우 작다는것을 알수 있다.

문제

1. 다음 글에서 옳고 그른것을 판단하고 그 근거를 밝히여라.
   ㄱ) 전자기파는 전기진동이 퍼져나가는것이 아니라 전자기마당이 전파되는것이다.
   ㄴ) 닫긴진동회로의 주파수는 열린진동회로의 주파수보다 반드시 작다.
   ㄷ) 60Hz의 교류회로에서는 전자기파가 거의 복사되지 않는다.
   ㄹ) 전자기파의 복사과정은 반드시 매질이 있어야 진행된다.
2. 가까운 곳에서 전기용접을 하거나 전차가 지나가면 라지오와 TV에서 《찌륵찌륵》하는 소리가 나고 화면이 이지러진다. 왜 그런가?
3. 축전기의 전기용량이 40pF이고 선륜의 유도결수가 10μH인 진동회로에서 복사되는 전자기파의 진동수와 파장을 구하여라.

제8절. 전자기파의 성질

전자기파의 성질

전자기파는 진공속에서뿐아니라 물질속에서도 전파된다.

진공속에서 전자기파의 전파속도는 진공속에서 빛의 전파속도 $c=3\times10^8$m/s와 같다.

다음으로 전자기파는 가로파이다.

주어진 점에서 자기마당은 전기마당과 수직이며 전기마당과 자기마당에 각각 수직인 방향으로 전자기파가 퍼져나간다.(그림 3-25)

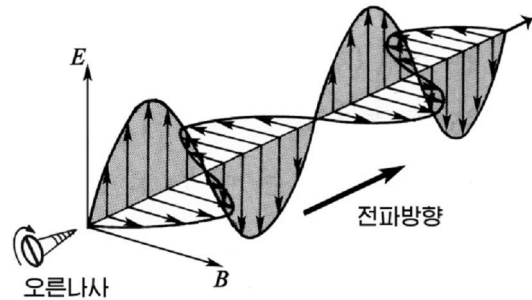



그림 3-25. 전자기파는 가로파이다

전기마당과 자기마당이 전자기파의 전파방향에 수직으로 진동하므로 전자기파는 가로파로 된다.

전자기파는 가로파로서 직진, 반사, 굴절, 간섭, 에돌이 등 파동의 본질적현상들을 잘 나타낸다.(그림 3-26)

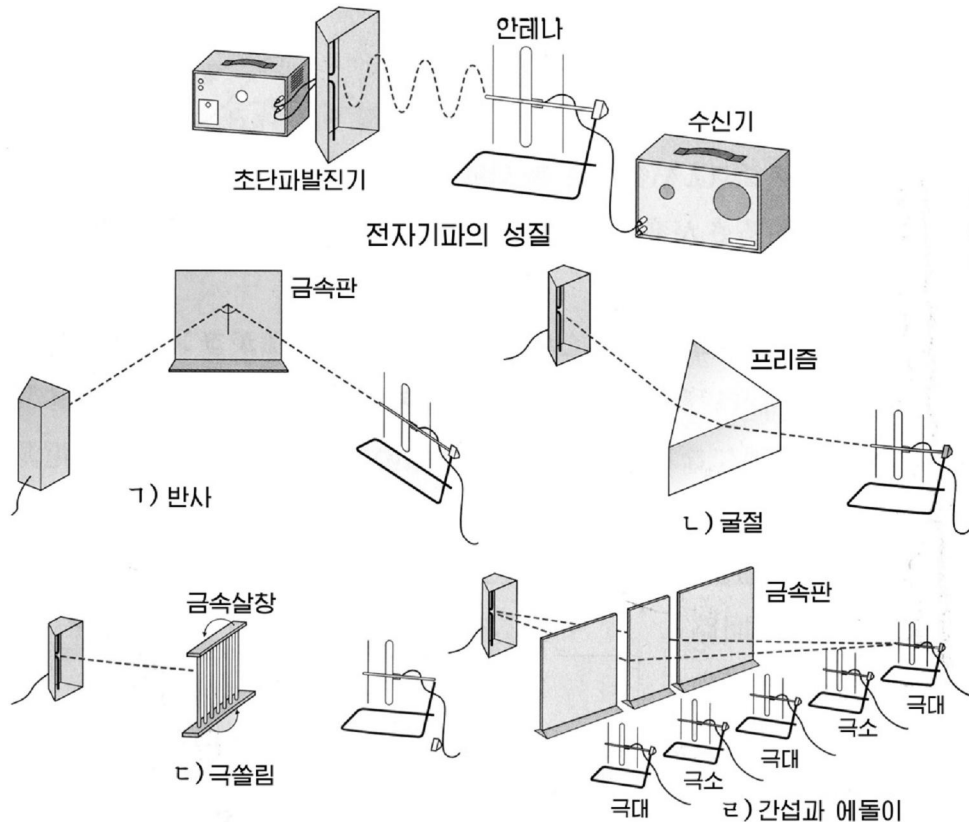



그림 3-26. 전자기파의 파동적성질

전자기파의 전파방식

전자기파는 파장에 따라 다음과 같이 나눈다.

전자기파의 파장대역

파장대역	주파수대역	대역이름	대역기호
10km~1km	0.3MHz	장파	LW
1km~100m	0.3~3MHz	중파	MW
100m~10m	3~30MHz	단파	SW, HF
10m~1m	30~300MHz	초단파	VHF
1m~10cm	300MHz~3GHz	극초단파	UHF
10cm~1cm	3~30GHz	초고주파	SHF
1cm~1mm	30~300GHz	극초고주파	EHF

전자기파는 파장에 따라 전파방식이 달라진다.

전파방식에는 **공간파전파방식**이 있다.

땅걸면 50km로부터 수백km사이에서는 많은 기체분자들이 태양빛에 의해 이온화되여 플라즈마상태에 있게 된다. 이 층을 **이온층**이라고 부른다. 이온층은 일정한 대역의 전자기파를 반사시킨다.

이온층에서 반사되여 전파되는 전자기파를 **공간파**라고 부른다. 공간파는 땅걸면과 이온층사이에서 여러번 반사되며 지어 지구를 빙 돌아올수도 있다.

전파방식에는 또한 **지표파전파방식**이 있다.

땅걸면을 따라 전파되는 전자기파를 **지표파**라고 부른다. 대체로 대류권이내(8km)에서 전파된다.

지표파의 전파에서는 에돌이현상이 잘 나타난다.

지표파의 전파에서는 땅걸면에서 전자기파의 회리손실을 잘 고려해야 한다. 지구가 도체이므로 변하는 전자기마당인 전자기파에 의하여 땅걸면에 회리전류가 발생한다. 회리전류는 전자기파의 에네르기손실을 가져온다. 주파수가 높을수록 전자기파는 땅에 흡수되여버리고만다. 그러므로 파장이 짧은 전자기파는 지표파로 전파되지 못한다.

대체로 장파, 중파, 단파가 공간파와 지표파로 전파된다. 장파와 파장이 비교적 긴 중파가 지표파로, 단파와 파장이 짧은 중파가 공간파로 전파된다.

공간파로 전파되는 단파통신에서는 일부 지역에서 신호를 받을수 없다.(그림 3-27) 이런 지역을 **불감지대**라고 부른다.

지표파로 전파되는 장파는 파장이 길어 에돌이가 잘 일어나며 흡수가 적어 멀리까지 전파된다. 장파는 신호가 고르롭고 믿음직하다. 라지오방송에서는 흔히 장파, 중파, 단파를 리용한다.

그림 3-27. 공간파의 불감지대

전자기파의 전파방식에는 **직진파전파방식**이 있다.

빛처럼 직진하는 전자기파를 **직진파**라고 부른다. 직진파는 대체로 눈으로 보이는 구역에서만 전파된다. 그러므로 보다 멀리 전파하려면 중계소를 세워야 한다.(그림 3-28)

그림 3-28. 직진파와 중계소

초단파보다 파장이 짧은 전자기파는 직진파로 전파된다. 이런 파는 장파, 중파, 단파에 비해 잡음이 적고 지향성이 강하다. 직진파는 TV방송에 널리 리용되며 인공지구위성을 리용하여 중계탑이 없이도 지구의 모든 곳에로 전파된다.

직진파는 레이다(전파탐지기)와 위성봉사체계에 리용된다.

[례제] 레이다로 물체까지의 거리를 재는 방법을 설명하여라.(그림 3-29)

풀이. 전자기파 1을 내쏘고 반사파 2를 수신한다. 전자기파는 파장에 관계없이 빛속도 c로 전파되므로 신호 1, 2사이의 시간을 측정하여 $S=ct/2$에 의하여 물체까지의 거리를 알수 있다. 실지 레이다설비에는 물체의 위치가 직접 영사막에 나타나게 되여있다.

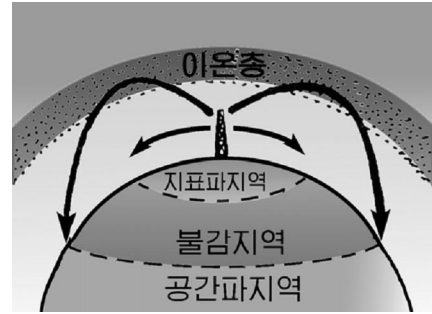
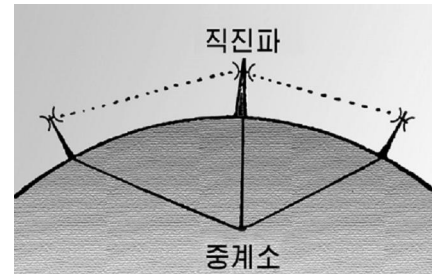
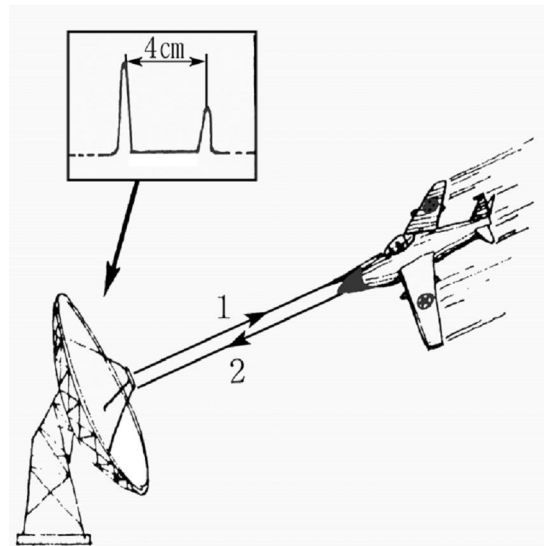



그림 3-29. 레이다에 의한 거리측정

문제

1. 단파라지오는 낮보다 밤에 더 고르롭고 크게 들린다. 그 리유는 무엇인가?(이온층이 태양빛의 세기에 따라 달라진다는것을 고려하여라.)
2. 가정용TV안테나는 어떻게 설치되여있는가?

복습문제(1)

1. 전압이 220V인 교류전원에 선륜을 이었더니 선륜에 0.4A의 전류가 흘렀다. 교류의 주파수가 60Hz라면 선륜의 자체유도결수는 얼마인가? 선륜의 유효저항은 무시한다.

 (답. 1.46H)
2. 가정용변압기의 입구에는 220V의 교류전압이 걸린다. 만일 입구에 220V의 직류전압을 걸면 어떻게 되겠는가? 왜 그런가?
3. 주파수가 10^3Hz인 교류회로에 자체유도결수가 0.5H인 선륜이 있다. 이 선륜에 걸리는 전압의 실효값이 220V라면 선륜에 흐르는 전류의 세기의 실효값과 최대값은 얼마인가?

 (답. 0.07A, 0.099A)
4. 전등과 축전기를 직렬로 잇고 교류전원에 그것을 련결하였다. 축전기에 다른 축전기를 병렬로 이으면 전등의 밝기는 어떻게 변하겠는가?
5. 60Hz의 교류에 대한 용량저항이 1 000Ω인 축전기가 있다. 10kHz인 교류에 대한 용량저항은 얼마인가?

 (답. 6Ω)
6. 전압이 220V인 교류전원에 4μF의 전기용량을 가진 축전기를 련결하면 276mA의 전류가 흐른다. 이 전원의 주파수를 결정하여라.

 (답. 50Hz)
7. R=400Ω, L=30H, C=20μF가 직렬련결된 회로에 ν=60Hz, U=220V의 교류전압이 걸렸다. 회로의 완전저항, 전류의 실효값 및 전압과 전류의 자리각차를 구하여라.

 (답. 1.12×10^4Ω, 20mA, 87.9°)

8. 유효저항이 12Ω이고 자체유도결수가 140mH인 선륜과 전기용량이 94μF 인 축전기가 직렬로 이어져있다. 여기에 전압이 110V이고 진동수가 60Hz인 교류전압을 걸었을 때 흐르는 전류의 세기와 축전기에서의 전압을 구하여라.

(**답.** 약 4A, 약 113V)

9. 24V, 35W 전등을 60Hz, 220V의 교류전압에 련결하려고 한다. 전등과 직렬로 전기용량이 얼마인 축전기를 련결해야 하는가? 이때 축전기의 절연내압은 최소한 얼마여야 하는가?

(**답.** 약 17.7μF, 약 309V)

10. C=20 μF 인 축전기와 L=1.38H인 선륜, R=1 000Ω인 저항이 직렬련결된 회로에 60Hz의 주파수를 가진 교류전류가 흐른다. 전류의 세기가 0.15A일 때 회로의 유효전력과 무효전력, 피상전력을 구하여라.

(**답.** 22.5W, 8.7VAr, 24.1VA)

11. 유효전력이 20kW인 전동기를 380V의 교류전압으로 운전하고 있다. 회로에 무효전력을 보상하여 력률을 0.8로부터 0.95로 높여주면 전류는 얼마나 줄어드는가?

(**답.** 10.4A)

12. 전압이 220V인 전원에 유효 및 무효저항을 직렬련결한 교류회로를 련결하면 력률이 0.6이다. 유효저항 및 무효저항에 걸린 전압을 구하여라.

(**답.** 132V, 176V)

13. 유효저항이 60Ω이고 유도결수가 0.2H인 전동기에 60Hz, 220V의 교류전압이 걸리면 유효전력은 얼마인가? 력률이 1이 되게 하자면 전기용량이 얼마인 축전기를 전동기에 어떻게 련결해야 하는가?

(**답.** 313W, 21.5μF, 직렬)

14. 전기용량이 150pF인 축전기와 유도결수가 0.4mH인 선륜으로 진동회로를 만들고 축전기를 12V로 충전시킨 다음 스위치를 닫았다.

ㄱ) 전기진동의 주기와 진동수는 얼마인가?

ㄴ) 스위치를 닫은 때로부터 전류가 최대로 되는 순간까지 얼마의 시간이 걸리는가?

ㄷ) 전류의 최대값은 얼마인가?

(**답.** ㄱ) 1.54μs, 약 6.5×10^5Hz ㄴ) 0.385μs ㄷ) 7.3mA)

15. 반경이 r=1.2cm인 두 금속원판이 d=0.3mm만 한 간격을 두고 평행으로 놓여있는 축전기와 L=3mH인 선륜으로 이루어진 회로의 고유주기는 얼마인가? 금속원판사이에 유전률이 ε=4인 유전체를 채우면 회로의 고유주기는 얼마로 되겠는가?

(**답.** 1.256×10^{-6}s, 2.512×10^{-6}s)

16. 전기용량이 0.1μF인 축전기를 5×10^{-5}C의 전기량으로 충전시킨 다음 선륜을 거쳐 방전시키면 감쇠전기진동이 일어난다. 진동이 완전히 멎을 때까지 회로에서 발생하는 열량은 얼마인가?

(**답.** 1.25×10^{-2}J)

17. R=2Ω인 저항, $L=\frac{1}{\pi}$H인 선륜, $C=\frac{1}{\pi}\mu$F인 축전기가 직렬련결된 회로에 고주파발진기를 련결하고 발진주파수를 변화시킨다. 발진기의 전압은 U=2V이다.

ㄱ) 주파수가 얼마일 때 전기공진이 일어나는가?

ㄴ) 전기공진이 일어날 때 전류의 세기의 실효값은 얼마인가?

ㄷ) 전기공진이 일어날 때 유도저항과 용량저항에 걸리는 전압의 실효값은 얼마인가?

(**답.** ㄱ) 500Hz ㄴ) 1A ㄷ) 1 000V, 1 000V)

18. 전기진동과 전자기마당은 서로 어떤 관계에 있는가?

19. 자체유도결수가 $L=3\times10^{-5}$H인 선륜과 극판면적이 $S=0.01\text{m}^2$, 극판간격이 d=0.1mm인 평판축전기로 된 전기진동회로가 있다. 이 회로에서 복사되는 전자기파의 파장이 750m라면 축전기에 차있는 유전체의 유전률은 얼마인가?

(**답.** 약 6)

20. $L=2\times10^{-3}$H인 선륜과 C_1=6.7pF로부터 C_2=53pF까지 변할수 있는 가변축전기로 전기진동회로를 만들었다. 진동회로에서 복사되는 전자기파의 파장범위를 구하여라.

(**답.** 약 218∼613m)

21. 전자기파는 보통의 파동과 어떤 점에서 차이나는가?

22. 극장에서 배우가 부르는 노래를 한사람은 극장안에서 배우로부터 68m 떨어진 곳에서 듣고 다른 사람은 30km 떨어진 곳에서 TV로 시청하고있다. 어느 사람이 소리를 먼저 듣겠는가? 소리의 속도는 340m/s, 전자기파의 속도는 3×10^{8}m/s이다.

(**답.**TV로 시청하는 사람)

23. 그림 3-30은 대양을 항행하는 배에 설치된 방향탐지안테나를 보여준다. 안테나는 신호가 최소일 때 자동적으로 멎는다. 전파방향에 대하여 어떤 각도에서 멎겠는가?

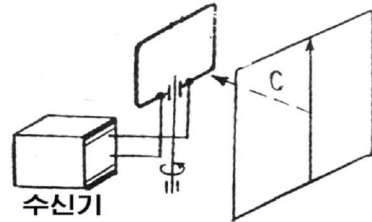



그림 3-30

24. 한 라지오방송국에서 복사된 전자기파를 50km 떨어진 수신국에서 수신할 때 직접 오는 파를 받은 다음 5.2×10^{-4}s 지나서 이온층에서 반사되여온 파를 받았다면 이온층의 높이는 얼마인가?

(**답.** 약 103km)

복습문제(2)

1. 선륜과 $R=110\Omega$인 저항이 주파수가 60Hz인 시누스교류전원에 병렬로 련결되였다. 이때 선륜에는 0.5A의 전류가 흐르고 저항에는 2A의 전류가 흐른다면 선륜의 유도결수는 얼마이겠는가? 선륜의 유효저항은 무시한다.

(**답.** 약 1.17H)

2. 자체유도결수가 0.5H인 선륜에 60Hz의 교류전압을 걸어줄 때 흐르는 전류의 세기의 실효값이 1.17A였다. 선륜에 걸어준 교류전압의 실효값과 최대값은 얼마인가?

(**답.** 220V, 311V)

3. $R=50\Omega$인 저항과 $L=0.015$H인 선륜(선륜의 유효저항은 무시한다.)을 병렬련결하고 교류전압 $u=100\sin 1\,000\pi t$ [V]를 걸어줄 때 저항과 선륜에 흐르는 전류의 식을 구하여라.

(**답.** $2\sin 1\,000\pi t$, $2.1\sin(1\,000\pi t-\pi/2)$)

4. 진동회로에 들어있는 축전기에 200V의 교류전압을 걸었더니 0.2A의 전류가 흘렀다. 교류의 주파수가 1kHz라면 축전기의 전기용량은 얼마이겠는가?

(**답.** 0.16μF)

5. 전기용량이 1.2μF인 축전기와 유도결수가 0.6H인 선륜을 직렬련결하고 주파수가 60Hz인 교류전압을 걸면 실효값이 0.11A인 전류가 흐른다. 걸어준 전압의 실효값은 얼마인가? 선륜의 유효저항은 무시한다.

(**답.** 약 218V)

6. 어떤 선륜에 20Hz, 100V의 교류전압을 걸어주면 25A의 전류가 흐르고 50Hz, 100V의 교류전압을 걸어주면 20A의 전류가 흐른다. 이 선륜의 자체유도결수와 유효저항을 구하여라.

(**답.** 0.01H, 약 3.8Ω)

7. C=20μF인 축전기와 R=150Ω인 저항을 직렬로 잇고 여기에 전압이 U=110V, 주파수가 ν=60Hz인 교류전압을 걸어주었다. 이때 축전기와 저항에 걸리는 전압은 각각 얼마인가? 그리고 U_C와 U_R사이에는 어떤 관계가 있는가?

(**답.** 약 72.9V, 82.5V, $\frac{U_C}{U_R}\approx 0.88$)

8. 2kΩ의 저항을 가진 저항기와 선륜을 직렬로 련결하고 단자에 60Hz, $10\sqrt{3}$V 의 교류전압을 걸었을 때 저항기와 선륜에는 10V의 같은 전압이 걸린다. 선륜의 유도결수, 전압과 전류의 자리각차를 구하여라. 선륜의 유효저항은 무시하지 않는다.

(**답.** 4.6H, $\pi/6$)

9. 저항 R_1=20Ω과 저항 R_2, 유도저항 X_L인 선륜이 직렬련결된 량끝에 U=120V의 교류전압을 걸었더니 R_1에서 전압은 U_1=44V이고 선륜에서 전압은 U_2=91V였다. R_1에서 소비되는 전력 P_1와 선륜에서 소비되는 유효전력 P_2을 구하여라. 이 회로의 력률은 얼마인가?

(**답.** 96.8W, 104.57W, 0.762)

10. R=80Ω인 저항과 C=44μF인 축전기를 직렬련결하여 주파수가 60Hz, 전압이 220V인 교류전원에 련결할 때 유효전력과

무효전력, 력률을 구하여라. 력률을 1로 되게 하자면 자체유도결수가 얼마인 선륜을 직렬련결해야 하는가? 이때의 유효전력은 얼마인가?

(**답.** 387.2W, 291.9VAr, 0.8, 0.16H, 605W)

11. 선륜의 자체유도결수가 12mH이고 축전기의 전기용량이 0.88μF라면 고유진동주파수는 얼마인가? 만일 꼭같은 세개의 축전기들을 진동회로에 직렬련결한다면 주파수는 어떻게 변하겠는가?

(**답.** 1 550Hz, 2 684.6Hz)

12. 유도결수가 0.07H인 선륜과 평판축전기로 이루어진 진동회로가 있다. 극판의 면적은 0.45m^{2}이고 극판사이에 끼운 파라핀종이의 두께는 0.1mm이며 그의 유전률은 2이다. 진동주기를 구하여라.

(**답.** 4.69×10^{-4}s)

13. 전류의 세기가 Δt =0.5s동안 1.5A 변할 때 유도전동력이 0.3mV 생기는 선륜과 전기용량이 900pF인 축전기가 만드는 진동회로가 있다. 이 진동회로의 고유주기와 진동수는 얼마로 되겠는가?

(**답.** 1.884×10^{-6}s, 5.3×10^{5}Hz)

14. 전기용량이 2μF인 축전기에 50V의 전압을 걸어주고 선륜을 이었더니 선륜에 흐르는 최대전류가 1.5A였다. 선륜의 자체유도결수를 구하여라.

(**답.** 2.2×10^{-3}H)

15. 저항 R, 유도결수 L, 전기용량 C를 직렬련결한 전기진동회로에 진폭은 일정하나 진동수가 변하는 교류전동력을 걸어주었다. 전원의 진동수가 변하다가 어떤 일정한 진동수에 도달했을 때 공진이 일어난다. 다음 전기용량을 절반 줄였더니 다시 일정한 시간이 지난 다음에 다른 어떤 진동수에서 공진이 일어났다.

ㄱ) 두 경우에 전류의 세기가 변하겠는가?

ㄴ) 두 경우에 공진진동수의 비는 얼마인가?

(**답.** 변하지 않는다. $\sqrt{2}$)

16. 극판의 면적이 S=100cm^{2}인 축전기와 유도결수가 1μH인 선륜으로 된 진동회로가 λ=10m 인 파장에 동조된다. 이때 축전

기의 두 극판사이의 거리 d를 구하여라.

(답. 314mm)

17. 고유전기진동회로에 흐르는 전류의 세기가 $i=0.02\sin 400\pi t$[A]이다. 회로에 들어있는 선륜의 유도결수가 1H일 때 진동주기, 축전기의 전기용량, 전기마당의 에네르기의 최대값을 구하여라.

(답. 5×10^{-3}s, 0.63μF, 2×10^{-4}J)

18. 진동회로에 들어있는 축전기에서 두 극판사이의 전압의 시간적 변화식이 $u=50\cos10^{6}\pi t$[V]로 주어졌다. 축전기의 전기용량이 0.1μF일 때 선륜의 유도결수, 이 회로에서 발진되는 전자기파의 파장을 구하여라.

(답. 1.014×10^{-6}H, 6×10^{2}m)

19. 주파수가 높은 전기진동은 센 전자기마당을 만든다. 왜 그런가?

20. 유전률이 ε이고 투자률이 μ인 매질속에서 전자기파의 전파속도는 $v=c/\sqrt{\varepsilon\mu}$ 와 같다. 전자기파가 진공으로부터 $\varepsilon=2$, $\mu=1$인 매질로 $45°$의 입사각으로 들어간다면 굴절각은 얼마인가?

(답. $30°$)

21. 자기마당이 전자기파의 전파방향에 수직이라는것을 어떻게 알아볼수 있는가?

22. TV방송안테나가 있는 곳은 흔히 사람들에게 알려져있으나 라지오방송안테나의 위치는 잘 알려져있지 않다. 왜 그런가?

제4장. 빛 파 동

우리는 물우에 퍼진 얇은 기름막(비가 온 뒤 물이 고인 곳에 휘발유가 조금 떨어져 퍼졌을 때)이나 CD판 같은것이 알락달락한 색무늬를 나타내는것을 자주 본다. 이 현상은 빛이 파동적성질을 가지고있다고 보면 잘 설명된다.

이 장에서는 빛을 파동으로 볼수 있는 근거는 무엇이며 파동으로서의 빛의 성질이 무엇인가 하는것을 빛의 간섭과 에돌이현상을 통하여 해명하면서 빛의 파동적성질이 어떻게 리용되는가를 배우게 된다.

제1절. 빛의 간섭

양그의 간섭실험

빛이 파동이라면 다른 력학적파동이나 전자기파에서처럼 간섭현상이 나타나야 할것이다.

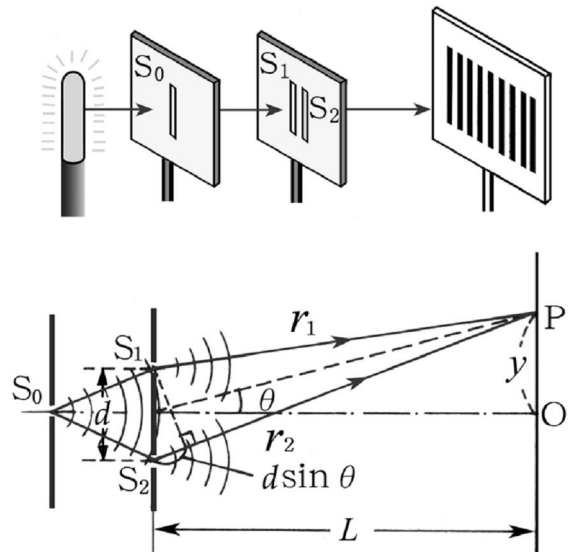
1801년에 양그(1773-1829)는 빛의 간섭무늬를 얻어내고 그에 대한 해석을 함으로써 빛의 파동성을 증명하였다.

빛의 간섭이란 무엇인가.

그림 4-1과 같이 광원에서 나온 파장이 λ인 단색빛으로 좁은 실틈 S_0이 있는 가림판에 쪼여주고 그로부터 얼마만큼 떨어져 두개의 실틈 S_1, S_2이 있는 가림판을 처음가림판에 평행되게 놓는다. S_0으로부터 실틈 S_1와 S_2까지의 거리가 같다면 두 실틈에서는 같은 자리각을 가진 빛파동이 나온다.

그림 4-1. 양그의 빛의 간섭실험

이때 비춤판에는 밝고 어두운 띠들이 엇바뀌여 나타난다. 광원과 실틈대신 두개의 레이자빛으로 비춤판을 비추면 밝고 어두운 띠들이 더 잘 나타난다.

이처럼 진동수와 자리각차가 일정한 두개의 빛이 겹쳐서 밝은

띠와 어두운 띠들이 엇바뀌여 나타나는 현상을 **빛의 간섭**이라고 부르며 이때 나타나는 무늬를 빛의 **간섭무늬**라고 부른다.

빛의 간섭무늬는 두 실틈 S_1, S_2에서 나온 빛들이 간섭하여 생긴것이다. 그러므로 두 실틈으로부터 비춤판우에 있는 점 P까지의 거리차 $\Delta r = |r_1 - r_2|$에 따라 P점에서의 합성파의 세기가 결정된다.

실험장치에서 알수 있는바와 같이 두 실틈 S_1, S_2사이 간격 d에 비하여 실틈판과 비춤판까지의 거리 L이 매우 크다면 거리차는 근사적으로 다음과 같이 쓸수 있다.(여기서 y는 비춤판의 중심 O로부터 P점까지의 거리이다.)

$$\Delta r = d\sin\theta \approx d\frac{y}{L}$$

이 거리차가 빛의 파장 λ의 옹근수배이면 점 P에서는 두 실틈에서 온 빛파동이 같은 자리각을 가지고 합성되므로 극대(밝은)자리로 된다.

$$\Delta r = d\frac{y}{L} = k\lambda$$

$y_{극대} = k\dfrac{L\lambda}{d} \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots)$ 간섭에서 극대조건

거리차가 반파장의 홀수배이면 점 P에서는 두 실틈에서 온 빛파동이 반대자리각을 가지고 합성되므로 극소(어두운)자리로 된다.

$$\Delta r = d\frac{y}{L} = (2k+1)\frac{\lambda}{2}$$

$y_{극소} = (2k+1)\dfrac{L\lambda}{2d} \quad (k = 0, \pm 1, \pm 2, \cdots)$ 간섭에서 극소조건

두 식에서 알수 있는것처럼 실틈간격이 좁고 빛의 파장이 길수록 무늬는 비춤판의 중심으로부터 멀리에 나타난다.

얇은 막에 의한 빛의 간섭

빛의 간섭현상은 얇은 막에서 잘 나타난다.

그림 4-2와 같이 굴절률이 n이고 두께가 d인 투명한 얇은 막에 파장이 λ인 단색빛이 입사한다고 하자.

막의 첫 경계면에서 반사되여나온 빛 1과 막에 들어갔다가 막

의 둘째 경계면에서 반사하여나온 빛 2는 한 광원에서 갈라졌다가 중첩되므로 간섭조건을 만족시키며 따라서 간섭무늬가 형성된다.

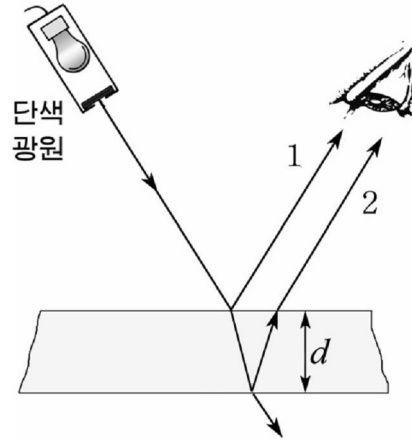



그림 4-3에서 보는바와 같이 막의 두께와 빛의 입사각을 적당히 변화시키면 겹친 두 빛선이 세질수도 있고 약해질수도 있다.

그림 4-2. 얇은 막에서 반사하는 빛

얇은 막에서 극대와 극소가 생기는 자리도 간섭에서 극대, 극소자리를 구하는것과 마찬가지이다. 다만 거리차를 구할 때 기하학적길이에 매질의 굴절률을 곱하는것과 파동이 밴 매질에서 반사될 때의 반파장손실을 고려하면 된다.

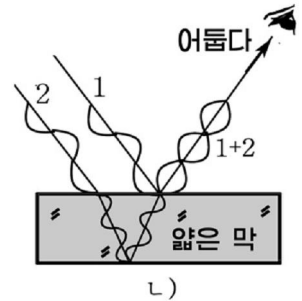
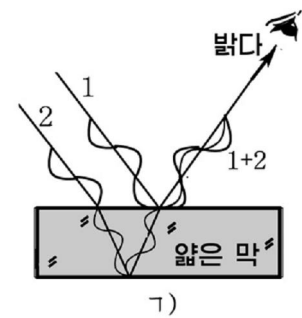



그림 4-3. 간섭조건

빛의 간섭현상은 광학기구들에 널리 쓰인다.

사진기와 망원경의 렌즈걸면에 적당한 두께의 얇은 막을 입히면 막의 웃면과 아래면에서 반사되여나온 빛이 중첩되여 반사빛의 세기가 령으로 된다.(그림 4-4의 ㄱ)

이와는 반대로 반사거울들에서는 물체로부터 오는 빛의 반사를 될수록 크게 하기 위하여 적당한 두께의 막을 입혀 그림 4-4의 ㄴ에서처럼 막의 웃면과 아래면에서 반사하는 빛이 겹쳐서 반사빛의 세기가 최대로 되게 한다.

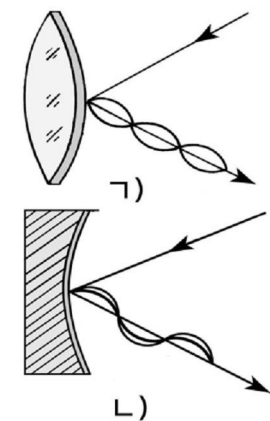



그림 4-4. 얇은 막을 입힌 렌즈와 반사거울

문제

1. 다음 글에서 옳고 그른것을 표시하고 그 근거를 밝혀라.
   ㄱ) 양그의 실험에서 흰색광원을 쓰면 간섭무늬가 생기지 않는다.
   ㄴ) 보통광원으로는 반드시 간섭무늬를 얻을수 없다.
   ㄷ) 보통광원으로 간섭무늬를 얻자면 반드시 한 점에서 나온

빛을 갈랐다가 겹치게 하여야 한다.

2. 두 실틈사이간격이 0.1mm이고 실틈판과 비춤판사이 거리가 60cm인 양그의 실험장치에서 파장이 590nm인 빛의 간섭무늬의 띠들사이간격은 얼마인가?
3. 얇은 막에서 반사하는 빛의 반파장손실에 대하여 설명하여라.

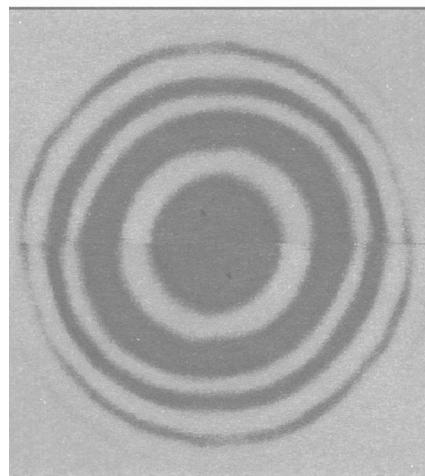
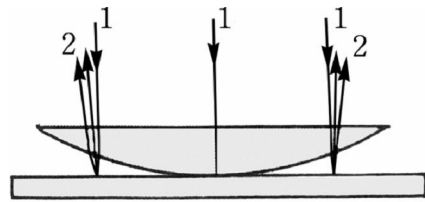
뉴톤고리

그림 4-5와 같이 평행평면유리판우에 구면반경이 큰 평면볼록렌즈를 볼록면이 아래로 향하게 올려놓고 빛을 수직으로 내려비출 때 생기는 동심원모양의 간섭무늬를 뉴톤고리라고 부른다.

그림 4-5. 뉴톤고리

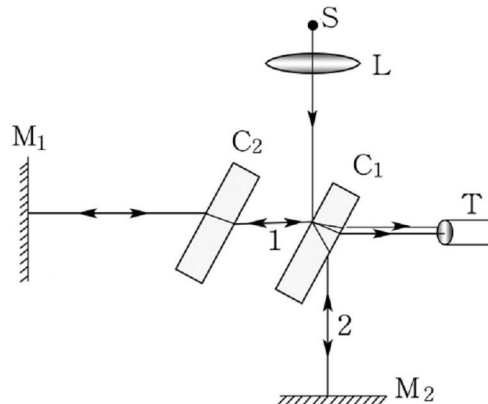
뉴톤고리는 1675년에 뉴톤(1642-1727)이 발견하였으나 옳게 설명하지 못하고 1801년에야 양그와 프레넬이 빛의 파동설로 설명하였다. 뉴톤고리는 유리판과 렌즈사이의 얇은 공기막에 의하여 나타나는 간섭무늬이다.

이 간섭무늬는 공기층의 두께에 따라 렌즈와 유리판의 접촉점을 중심으로 동심원모양으로 분포된다.

간섭무늬는 볼록렌즈의 아래면에서 반사하는 빛선 1과 유리판의 웃면에서 반사하는 빛선 2가 간섭하여 생긴다.

간 섭 계

간섭현상을 리용하자면 그에 해당한 장치가 있어야 한다. 일반적으로 간섭현상을 여러가지 목적에 효과적으로 리용할수 있게 만든 장치를 간섭계라고 부른다. 간섭계에는 구조와 리용목적에 따라 마이켈손간섭계, 제만간섭계 등 여러가지가 있다.

그림 4-6. 마이켈손간섭계

그림 4-6에 대표적인 간섭계의 하나인 마이켈손간섭계를 주었다. 여기서 M_1, M_2

은 평면반사거울, C_1는 반투명거울, C_2은 C_1에 평행인 평행투명판, T는 망원경이다.

광원 S에서 나온 단색빛은 렌즈 L에 의하여 평행빛으로 되여 C_1에 45^o의 각으로 들어가며 이 빛선은 두 갈래로 갈라져 M_1, M_2에 의하여 반사된다. 이 반사된 빛들이 망원경 T로 들어갈 때 두 빛 1, 2가 간섭하여 간섭무늬가 관측된다.

제2절. 빛의 에돌이

빛이 파동이라면 간섭현상뿐아니라 에돌이현상도 나타날것이다.

틈과 구멍에 의한 빛의 에돌이

밤에 멀리에 있는 가로등을 눈을 쪼프리고 보면 어떻게 보이는가.

실험

○ 검은 종이에 면도칼로 실틈을 따내고 가열선조가 직선인 광원을 실틈에 평행되게 놓고 광원을 본다.(그림 4-7의 ㄱ)

○ 연필 두자루를 맞쥐여 실틈이 생기게 하고 이 실틈을 통해 형광등을 본다. 연필을 꽉 쥐였다놓았다하면서 실틈의 너비를 변화시켜본다.(그림 4-7의 ㄴ) 형광등은 옆으로 퍼져보이고 그 주위에 약간 밝은 띠들이 여러개 보인다.

그림 4-7. 실틈을 통하여 광원을 본다

○ 실틈판과 비춤판을 평행으로 세우고 레이자빛을 실틈에 비춘다. 비춤판중심에 밝은 점이 나타나고 그 량쪽에 이보다 약간 어두운 점들이 나타난다.(그림 4-8)

실험은 빛이 실틈을 지날 때 에돌아서 실틈으로 들어오는 방향과 다른 방향으로도 퍼져나간다는것을 보여준다.

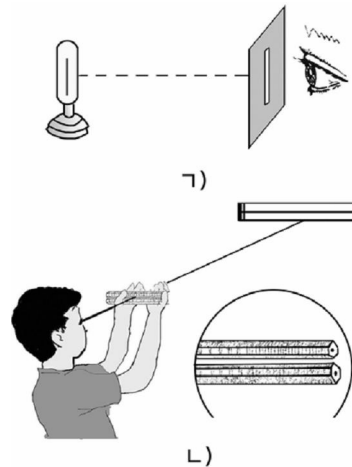
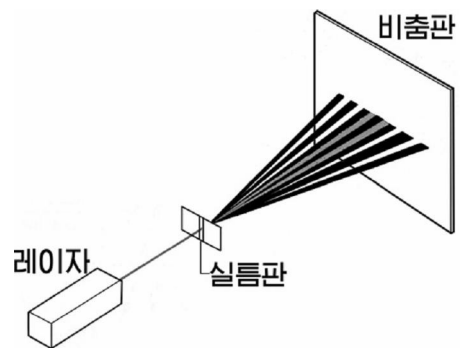



그림 4-8. 레이자빛의 에돌이

빛이 전파되다가 실틈이나 장애물기슭에서 그 일부가 전파방향을 바꾸어 에돌아나가는 현상을 **빛의 에돌이**라고 부른다.

실험에 의하면 실틈이 좁을수록 에돌이무늬는 더 퍼지고 실틈이 넓을수록 에돌이무늬들사이의 간격이 더 좁아지다가 나중에는 광원이 똑똑히 보인다.(그림 4-9)

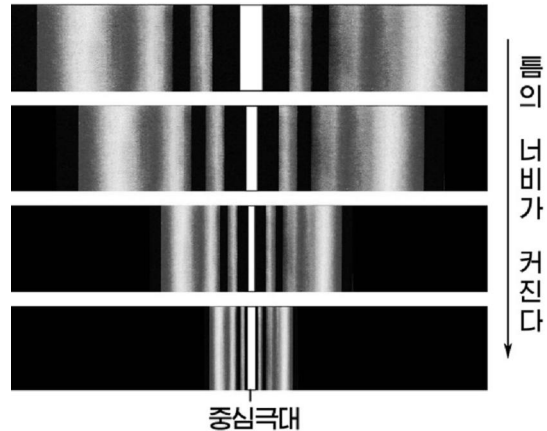



그림 4-9. 틈의 너비에 따르는 에돌이무늬

빛의 에돌이는 장애물의 크기나 틈의 너비가 빛의 파장정도로 매우 작을 때 잘 나타난다.

작은 구멍을 지나는 빛은 어떻게 되겠는가.

실험

○ 검은 종이에 뚫은 바늘구멍을 거쳐 작은 전등을 본다.

○ 직경이 다른 구멍들로 같은 실험을 한다.(그림 4-10) 전등이 퍼져보이고 그 주위에 밝고 어두운 고리들로 이루어진 무늬가 보인다. 이것이 원형구멍에 의한 빛의 에돌이무늬이다.

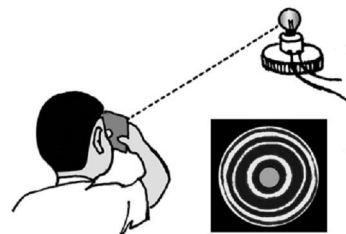



그림 4-10. 작은 구멍에 의한 빛의 에돌이

구멍이 작을수록 에돌이가 심해지며 구멍이 클수록 에도는 빛이 약해지고 곧추 가는 빛이 세진다. 구멍이 완전히 열리면 빛이 막히지 않아 에돌지 않고 곧추 간다.

현미경이나 망원경 같은 광학기구에서는 렌즈의 테두리가 원형구멍과 같은 작용을 하므로 에돌이를 일으키여 영상의 질을 나쁘게 한다.

에돌이살창에 의한 빛의 에돌이

실천에서는 하나의 틈보다도 수없이 많은 틈에 의한 에돌이무늬가 쓰인다. 그것은 많은 틈에 의한 에돌이무늬가 더 밝고 뚜렷하기때문이다.

너비가 꼭같은 틈들을 일정한 사이를 두고 평행이 되게 배렬한것을 **에돌이살창**이라고 부른다.(그림 4-11)

에돌이살창은 투명한 평행유리판우에 알루미니움과 같은 금속을 엷게 증착하여 입히고 1mm안에 수십～수백개의 홈을 파서 틈을 낸것이다.

그림 4-11. 에돌이살창

에돌이살창은 살창상수로 특징짓는다. 틈의 너비를 a, 틈사이의 살창두께를 b라고 할 때 $d=a+b$를 **살창상수**라고 부른다.

에돌이살창을 통하여 빛이 들어오는 실틈을 보면 간섭무늬가 보이는데 이 밝은 띠들은 하나의 실틈이나 두개의 실틈(양그의 실험)에 의한 띠들보다 더 예리하고 밝다.(그림 4-12)

그림 4-12. 에돌이살창을 통하여 실광원을 본다

에돌이살창에서 밝은 띠가 생기는 자리는 어떻게 결정하는가.

파장이 λ인 단색평행빛이 살창상수가 d인 에돌이살창에 수직으로 입사한다고 하자.

매 틈에서 나가는 요소파(한개의 파면우의 점들로서 같은자리각으로 떠는 파)가 입사빛선의 전파방향에 대하여 각 θ를 이루는 방향으로 전파되는 평행빛묶음을 보자.(그림 4-13)

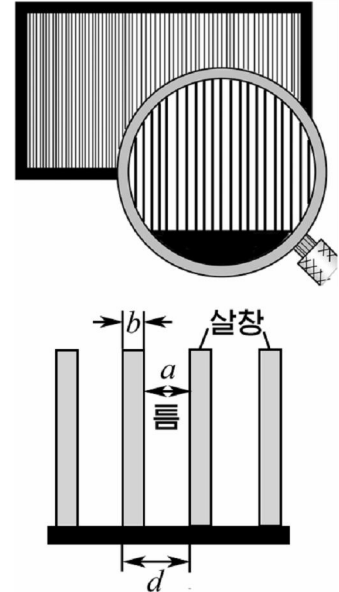
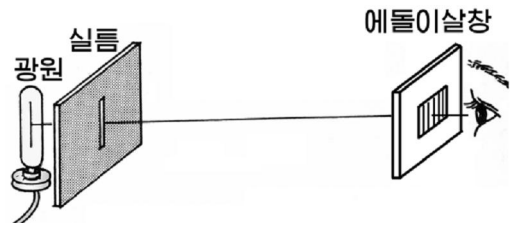
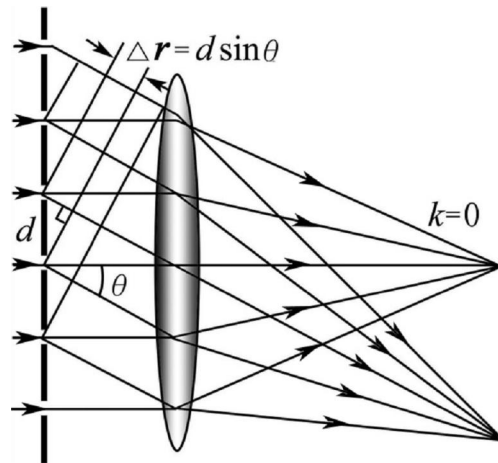



그림 4-13. 에돌이살창에서 밝은 띠가 생기는 자리

린접한 두 틈으로부터 에돌이

하여 나가는 요소파들의 거리차는 $\Delta r = d\sin\theta$ 와 같다. 매개 틈들에는 하나의 파면이 도달하므로 그 요소파원들은 진동수와 자리각이 꼭같다.

그러므로 Δr 가 λ의 옹근수배이면 모든 틈에서 그 방향으로 나가는 요소파들은 일정한 자리각차를 가지며 중첩하면서 극대(밝은 띠)를 형성한다.

그러므로 에돌이살창에 의하여 간섭무늬에 밝은 띠가 나타날 조건은 다음과 같다.

$d\sin\theta = k\lambda$ (k=0, ±1, ±2, ⋯) 에돌이살창에서 극대조건

여기서 k는 무늬의 차수이다.

웃식에서 보면 빛의 파장 λ가 클수록 에돌이각 θ가 크다.

그러므로 여러가지 파장의 빛이 섞인 흰빛이 에돌이살창을 지나면 빛은 파장별로 갈라져서 스펙트르를 이룬다.(그림 4-14)

에돌이살창을 스펙트르분석과 빛의 파장을 재는데 리용한다.

보임빛의 파장

색	파장 [nm]
붉은색빛	760~620
감색빛	620~590
누런색빛	590~560
풀색빛	560~510
푸른색빛	510~450
남색빛	450~430
보라색빛	430~380

그림 4-14. 에돌이스펙트르

[례제] 2cm 너비에 8 000개의 틈이 있는 에돌이살창에 어떤 색의 단색빛을 수직으로 통과시켰더니 $\theta=26°$ 방향에서 밝은 띠가 나타났다. 이 빛은 어떤 색의 빛인가?

풀이. 주어진것: $l=2\text{cm}$

$n=8\ 000$

$\theta=26°$

구하는것: λ?

에돌이살창의 살창상수는 $d=\frac{l}{n}=\frac{2\times10^{-2}}{8\,000}=2.5\times10^{-6}$ (m)

$\theta=26^\circ$ 방향에 극대가 생기는 빛의 파장을 구하면

$$\lambda=\frac{1}{k}d\sin\theta=\frac{1}{k}\times2.5\times10^{-6}\times0.438=$$

$$=\frac{1}{k}\times1.1\times10^{-6}(\text{m})=\frac{1}{k}\times1\,100(\text{nm})$$

이때 $k=1$이면 $\lambda_1=1\,100$nm(적외선)

$k=2$이면 $\lambda_2=550$nm(풀색)

$k=3$이면 $\lambda_3=367$nm(자외선)

적외선과 자외선은 보이지 않으므로 26° 방향으로 에도는 빛은 풀색이다.

문제

1. 다음 글에서 옳고 그른것을 찾고 그 근거를 밝혀라.

ㄱ) 빛의 에돌이는 빛의 파동성을 보여주는 현상들중의 하나이다.

ㄴ) 양그의 간섭무늬와 한개 실틈에서 나온 빛의 에돌이무늬는 본질이 다르다.

ㄷ) 빛의 파장이 길수록 에돌이각 θ가 더 크다.

ㄹ) 틈의 너비가 넓을수록 에돌이무늬의 너비가 크다.

2. 머리빗은 살창모양을 이루고있으나 에돌이무늬를 만들지 못한다. 왜 그런가?

3. 파장이 590nm인 빛(나트리움등빛)이 3cm 너비에 18 720개의 틈이 있는 에돌이살창을 수직으로 지날 때 1차극대가 나타나는 에돌이각을 구하여라.

4. 파장이 546nm인 빛(수은등빛)을 에돌이살창에 수직으로 비추었더니 30° 방향에 2차극대가 생겼다. 이 에돌이살창의 1cm 너비에 몇개의 틈이 있는가?

제3절. 빛의 쏠림

빛은 가로파인가, 세로파인가

빛의 간섭과 에돌이는 빛이 파동이라는것을 말해주지만 가로파인가 세로파인가 하는것은 밝히지 못한다. 이것을 실험으로 알아보자.

실험

○ 빛이 지나가는 길우에 빛쏠림판 하나를 전파방향에 수직되게 설치하고 빛선둘레에서 천천히 돌려보면서 비춤판에 떨어지는 빛의 밝기변화를 고찰한다. 빛의 밝기변화가 없다.

○ 다음 빛쏠림판 두개를 빛선방향에 각각 수직으로 배치하고 그중 하나(비춤판쪽의 빛쏠림판)를 천천히 돌리면서 비춤판에 떨어지는 빛의 밝기변화를 본다. 빛의 밝기변화가 있다.(그림 4-15)

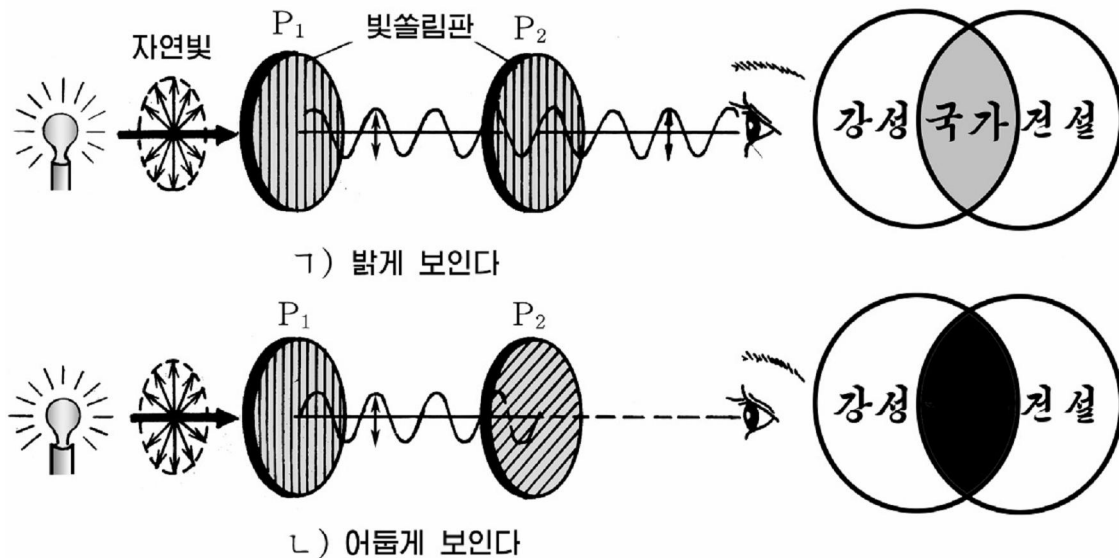
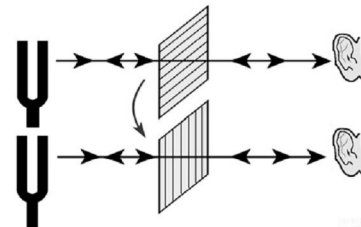



그림 4-15. 두 빛쏠림판을 통과한 빛의 세기

실험으로부터 무엇을 알수 있는가.

빛이 소리파와 같은(그림 4-16) 세로파라면 세로파는 진동방향이 전파방향(빛선방향)과 일치하기때문에 우와 같이 실험할 때 빛의 밝기변화가 없을것이다.

그림 4-16. 세로파의 파선과 진동방향

그러나 빛이 가로파라면 가로파는 진동방향이 전파방향과 서로 수직이면서 무수

히 많기때문에 우와 같이 실험할 때 빛의 밝기변화가 있을것이다.(그림 4-17)

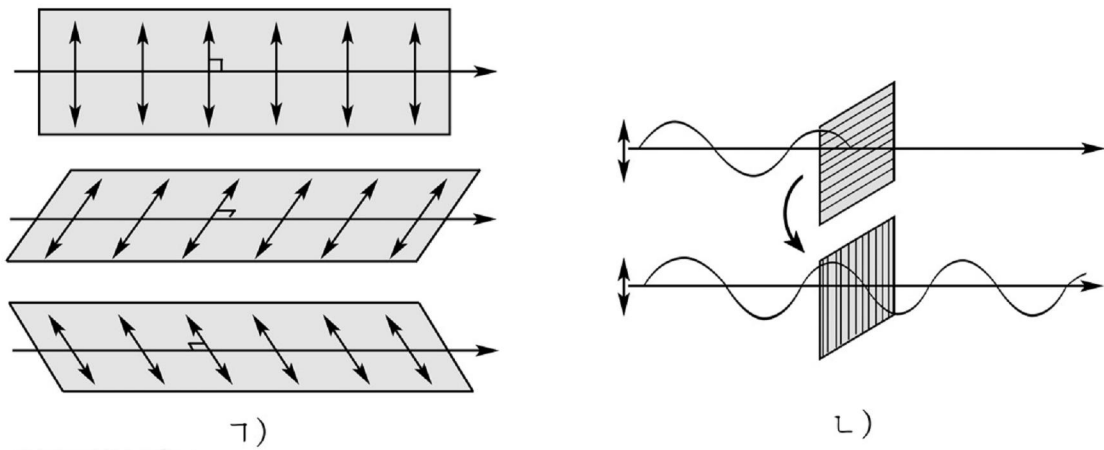



그림 4-17. 가로파의 파선과 진동방향

실험으로부터 빛은 가로파이다는것을 알수 있다.

빛의 쏠림

보통 광원에서 나오는 빛이나 해빛은 무수히 많은 원자, 분자들이 제각기 서로 다른 방향으로 진동하면서 내보내는 빛파동이다.

전파방향에 수직인 면에서 모든 방향으로 꼭같은 진폭으로 진동하는 빛을 **자연빛**이라고 부른다.(그림 4-18의 ㄱ)

자연빛을 하나의 빛쏠림판에 들여보낼 때 어떤 방향에서는 진폭이 약해진 가로파가 통과하고 어떤 방향에서는 진폭이 변하지 않는 가로파가 통과한다.

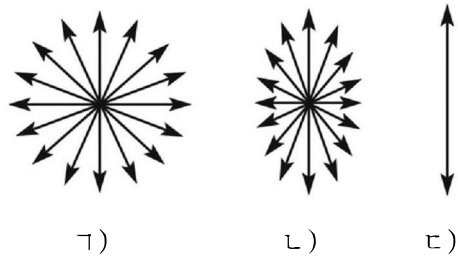



그림 4-18. 자연빛과 쏠림빛

빛의 전파방향에 수직인 면에서 방향에 따라 진폭(빛의 밝기)이 약해진 방향과 진폭이 변하지 않는 방향이 있는 빛을 **쏠림빛**이라고 부른다.(그림 4-18의 ㄴ, ㄷ)

자연빛이 쏠림빛으로 되는것을 **빛의 쏠림**이라고 부른다.

전파방향에 수직인 면에서 방향에 따라 진폭이 서로 다른 쏠림빛을 **부분쏠림빛**이라고 부른다.(그림 4-18의 ㄴ)

쏠림빛중에도 어떤 한 방향으로만 진동하는 쏠림빛(그림 4-18의 ㄷ)을 **완전쏠림빛**이라고 부른다.

반사하는 빛의 쏠림

빛은 유리나 물면, 책상면 같은데서 반사할 때에도 빛쏠림 된다.

일반적으로 반사빛은 쏠림빛이다.(그림 4-19)

실험에 의하면 공기와 굴절률이 n인 물질의 경계면에서 반사하는 빛은 다음과 같은 조건을 만족시킬 때 완전쏠림빛이 된다.

그림 4-19. 반사빛의 쏠림

$$\tan \alpha_{ㅂ} = n$$

여기서 입사각 $\alpha_{ㅂ}$를 **브류스터각**(완전쏠림각)이라고 부른다.

반사빛의 쏠림현상은 유리창안이나 물속에 있는 물체를 보거나 사진찍을 때 반사빛이 방해하는것을 막는데 쓴다.

문 제

1. 다음 글에서 옳고 그른것을 판단하고 그 근거를 밝혀라.

ㄱ) 파동의 전파방향에 어떤 물체를 놓고 돌릴 때 파동의 세기가 변하면 반드시 가로파이다.

ㄴ) 자연빛은 하나의 빛쏠림판을 지나면서 반드시 쏠림빛으로 된다.

ㄷ) 반사빛은 반드시 입사면에 수직으로 떠는 쏠림빛이다.

ㄹ) 자연빛을 쏠림빛으로 전환시키자면 반드시 빛쏠림판을 두개 써야 한다.

2. 그림 4-20을 보고 ㄱ의 경우 비춤판이 어두워지지 않고 ㄴ의 경우 비춤판이 어두워지는 원인을 설명하여라.

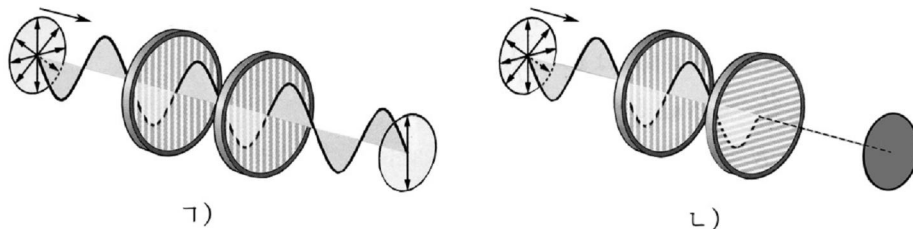



그림 4-20

3. 공기중에서 전파하던 빛이 굴절률이 1.5인 유리와 굴절률이 1.33인 물면에서 반사할 때 브류스터각을 구하여라.

빛쏠림판

빛쏠림판을 일명 뽈랴로이드판이라고도 부른다. 뽈랴로이드는 폴리비닐알콜수지판을 요드용액에 잠그었다가 꺼내여 늘군 다음 말리워서 얻는다. 빛쏠림판에는 빛축이라고 부르는 축이 있는데 이 축에 평행으로 진동하는 빛은 흡수되고 수직으로 진동하는 빛은 통과된다.

빛쏠림판은 대체로 한방향으로 나란히 배렬된 살창으로 리해할수도 있다. 이때 살창간격은 nm정도이다. 빛축에 놓인 면 즉 빛쏠림판을 통과하는 빛의 진동방향과 전파방향으로 이루어진 면을 **주평면**이라고 부른다.

제4절. 빛의 분산

빛의 분산

빛스펙트르를 얻는데는 에돌이살창과 함께 프리즘을 쓴다.

해빛을 프리즘으로 지나보내면 무지개처럼 아름다운 색빛들로 갈라지는데 파장이 긴 붉은색빛은 제일 약하게 굴절되고 파장이 짧은 보라색빛은 제일 세게 굴절된다.(그림 4-21)

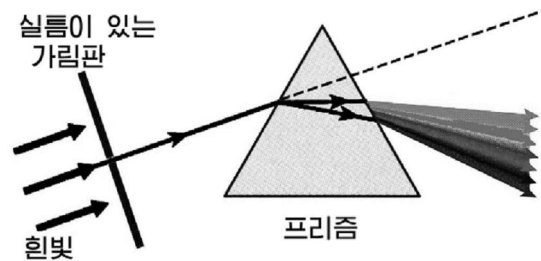



그림 4-21. 프리즘에 의한 빛의 분산

파장이 서로 다른 빛들의 모임인 해빛이 프리즘을 통과할 때 여러가지 색빛으로 갈라지는것은 빛의 파장에 따라 굴절각이 다르며 따라서 물질의 굴절률이 빛의 파장에 따라 다르다는것을 말해준다.

물질의 굴절률이 빛의 파장에 따라 달라서 빛이 파장별로 갈라지는 현상을 **빛의 분산**이라고 부른다.

빛을 파장별로 갈라서 스펙트르를 얻는데 쓰는 광학기구를 **분광기**라고 부른다.(그림 4-22)

분광기의 기본부분은 실름 S, 입사렌즈 L_1, 프리즘(또는 에돌이살창) P, 출사렌즈 L_2로 되여있다. 분광기에는 에돌이살창분광

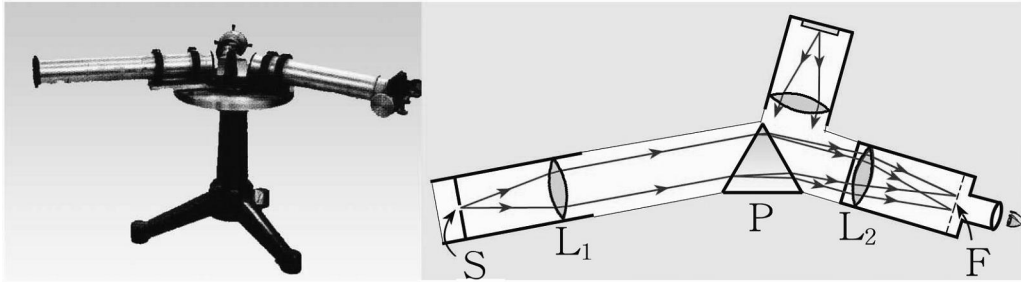



그림 4-22. 분 광 기

기도 있는데 프리즘 P대신 에돌이살창을 쓰면 에돌이살창분광기라고 말한다. 광원에서 나온 빛이 실틈 S를 지나 분광기에 들어오면 렌즈 L_1은 그 빛을 평행빛으로 만들어 프리즘 P에 보낸다. 프리즘을 지난 빛들은 파장별로 갈라진다. 프리즘의 매개 부분에서 파장별로 갈라진 빛들은 같은 파장의 빛들끼리 서로 평행이므로 렌즈 L_2에 의하여 색갈별로 모인다. 같은 색갈의 빛들은 면 F에 스펙트르를 만든다.

이 스펙트르를 눈으로 직접 보게 된 분광기에는 대안렌즈가 있으므로 그것을 통하여 스펙트르를 직접 본다. 면 F자리에 사진건판(사진필림)을 설치하면 스펙트르가 이 사진건판에 찍히운다.

빛의 스펙트르

빛의 스펙트르에는 복사스펙트르와 흡수스펙트르가 있다.

광원에서 나온 빛을 분광기의 실틈에 넣어 얻은 스펙트르를 **복사스펙트르**라고 부른다

복사스펙트르는 빛을 내보내는 여러가지 광원에 따라 련속스펙트르, 선스펙트르, 띠스펙트르로 나눈다.

가열된 고체는 넓은 파장구역에 속하는 모든 빛을 다 낸다. 이러한 빛의 스펙트르는 무지개처럼 련속적으로 분포된 넓은 색띠로 되는데 이것을 **련속스펙트르**라고 부른다.(그림 4-23의 ㄱ)

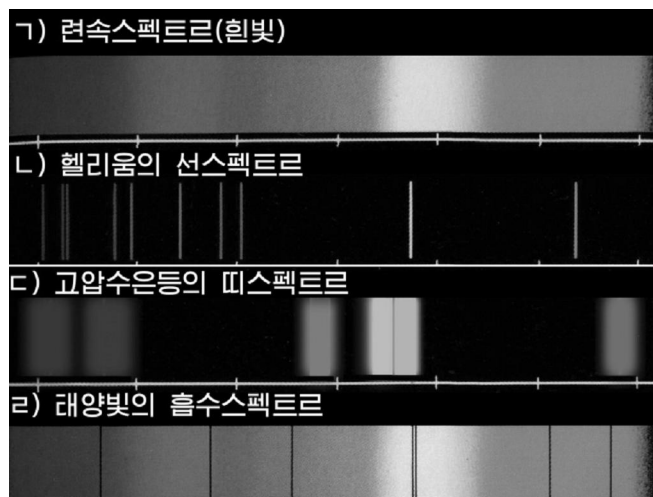



그림 4-23. 여러가지 스펙트르

수소등이나 헬리움등 같은 기체방전등에서는 몇개 파장의 빛들만 나온다. 때문에 이런 빛을 분광기에 넣으면 스펙트르는 띠염띠염 떨어져있는 몇개의 선들밖에 없다. 이것을 **선스펙트르**라고 부른다.(그림 4-23의 ㄴ)

기체방전등속의 기체의 압력이 높으면 스펙트르선들이 넓은 띠들로 되는데 이러한 스펙트르를 **띠스펙트르**라고 부른다.(그림 4-23의 ㄷ)

련속스펙트르를 이루는 빛이 물질을 지나면 일부 파장의 빛들이 흡수된다. 빛이 물질을 지나면서 흡수된 결과 그 빛이 놓일 자리가 검게 되는 스펙트르를 **흡수스펙트르**라고 부른다.(그림 4-23의 ㄹ)

물질의 스펙트르분석을 **분광분석**이라고 부른다.

적외선과 자외선

눈에 보이는 여러가지 색갈의 빛을 **보임빛**이라고 부른다.

태양빛에는 보임빛(흰색빛)외에도 사람의 눈에 보이지 않는 빛도 섞여있다.(그림 4-24)

붉은색빛보다 파장이 길면서 보이지 않는 빛을 **적외선**이라고 부르며 보라색빛보다 파장이 짧으면서 보이지 않는 빛을 **자외선**이라고 부른다.

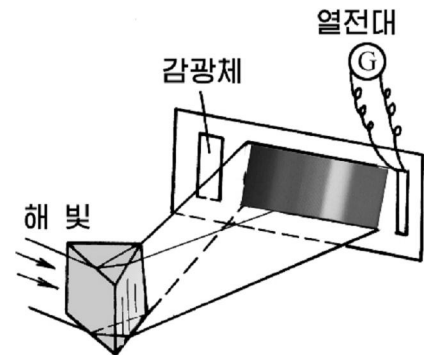



그림 4-24. 적외선과 자외선

적외선의 가장 중요한 성질은 열작용이 강한것이다. 그러므로 적외선을 《열선》이라고도 한다. 또한 적외선은 붉은색보다 파장이 길기때문에 에돌이현상이 강하게 나타나며 다른 물질을 지날 때 멀리 간다. 그러므로 적외선을 리용하면 일기조건(구름, 안개, 연기, 먼지, 밤)에 관계없이 사진을 찍을수 있다. 적외선은 특히 군사분야의 적외선사진촬영, 야시경, 적외선추종로케트 등에서 매우 중요한 역할을 한다. 또한 모든 물체들이 적외선을 내보내므로 비행기나 위성으로 지열을 탐지할수 있으며 수원을 찾거나 화재를 감시할수도 있다.

자외선은 태양과 같은 고온물체에서 나오는데 사진작용과 같은 화학작용, 형광작용, 살균소독작용, 이온화작용 등을 한다.

자외선의 이러한 작용을 리용하여 형광등, 자외선등을 만든다. 자외선등은 병원의 호실이나 수술실을 소독하거나 피부병을 치료하는데 쓰인다. 자외선의 사진작용을 리용하면 매우 미소한 차이(례를 들어 종이에 남긴 지문)를 똑똑히 알아낼수 있다.

자외선은 기체분자를 원자로 갈라놓으며 그것을 다시 양이온, 음이온으로 가르는 작용을 한다. 대기의 이온층은 태양에서 나오는 자외선에 의하여 생긴것이다.

문제

1. 흰빛의 스펙트르를 얻는 방법에는 어떤것들이 있으며 그렇게 얻은 스펙트르무늬는 어떤 점에서 차이나는가?
2. 흰빛을 갈랐다가 다시 모으면 흰빛이 나올수 있는가?
3. 유리로 만든 량면볼록렌즈가 있다. 붉은색빛과 푸른색빛에 대한 이 렌즈의 초점을 그림에 표시하여라.

무지개와 쌍무지개

비가 온 뒤 무지개는 어떻게 생겨나는가.

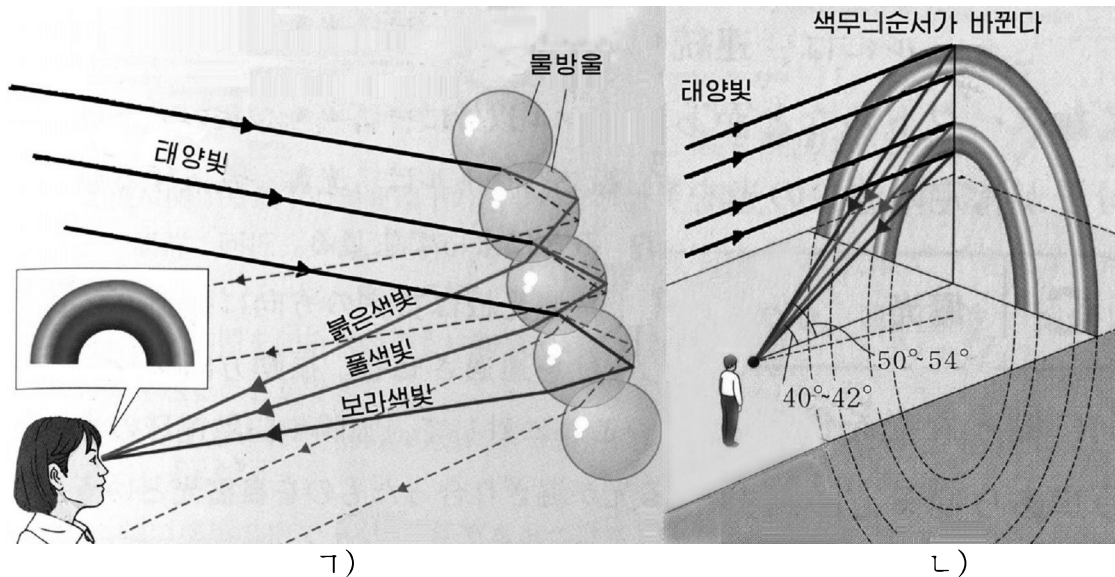



그림 4-25. 무지개가 생기는 리치와 쌍무지개의 색갈분포

비가 멎은 후 해가 비치면 공중에 떠있는 물방울들에서 해빛이 분산된 결과에 무지개가 생긴다. 물방울에서 빛은 굴절, 반사하는데 파장이 긴 붉은색빛은 적게 굴절되고 파장이 짧은 보라색빛은 더 많이 굴절된다. 그리하여 해를 등지고 하늘을 보는 사람의 눈에는 높은 물방울들로부터는 붉은색빛이, 좀 낮은 물방울들로부터는 보라색빛이 들어와 무지개를 본다.(그림 4-25의 ㄱ)

쌍무지개는 보다 높은 곳에 있는 물방울들에 들어간 해빛이 물방울속에서 두번 반사, 굴절하여 나오는것과 관련된다. 때문에 쌍무지개에서 우에 생기는 무지개는 아래 무지개와 색갈분포가 반대로 된다.(그림 4-25의 ㄴ)

제5절. 빛의 산란

빛의 산란과 그 원인

맑게 개인날 하늘을 보면 푸르게 보인다. 또 마른 나무가 탈 때 나는 연기는 파랗게 보이지만 약간이라도 젖은 나무가 탈 때 나는 연기나 안개는 희게 보인다.

이런 현상은 무엇으로 설명하는가.

실험

○ 맑고 깨끗한 물을 투명한 유리그릇에 담고 한쪽에서 빛을 쪼이면서 빛의 전파방향과 수직되는 방향에서 빛흐름을 본다. 빛줄기가 잘 보이지 않는다.

○ 유리그릇에 담은 물에 우유를 몇방울 떨구고 빛을 쪼여준다. 이번에는 옆에서도 빛줄기를 똑똑히 볼수 있다.(그림 4-26)

그림 4-26. 깨끗한 물에서와 흐린 물에서 빛의 전파

우의 실험은 맑고 깨끗한 물속에서는 빛이 본래의 전파방향으로 곧추 나가지만 흐린 물속에서는 그 일부가 옆으로도 흩어져나간다는것을 보여준다.

탐조등의 빛줄기나 창문틈으로 흘러들어오는 빛줄기(해살)를 보는것도 이와 같은 현상이다.

빛이 매질속으로 전파할 때 그 일부가 본래의 전파방향에서 벗어나 사방으로 흩어지는 현상을 **빛의 산란**이라고 부른다.

이런 현상은 빛파동에서뿐아니라 소리파, 초음파, 라지오파에서도 나타난다.

빛의 산란이 일어나는 원인은 빛에 대하여 매질이 불균일한데 있다.

고른매질속에 그 매질과 성질이 다른 립자들이 무질서하게 섞여있으면 그 매질은 불균일한 매질로 된다.

매질이 불균일하다는것은 광학적으로 불균일하다는 뜻이며 이것은 굴절률이 매질의 매 점에서 서로 다르다는것을 의미한다.

일반적으로 매질의 불균일성을 조성하는 불균일요소나 립자를 **산란중심** 또는 **산란립자**라고 부른다.

매질속에서 빛의 산란이 일어나는것은 이러한 산란립자들이 무질서하게 분포되여있는것과 관련된다.

빛의 산란형태

빛의 산란형태에는 깨끗한 매질속에서의 빛의 산란과 흐린 매질속에서의 빛의 산란이 있다.

? 맑은 하늘이 왜 푸르게 보이는가.

깨끗한 매질속에서의 빛의 산란은 대체로 분자들의 무질서한 열운동때문에 생긴 밀도의 불균일성에 의하여 일어난다. 이러한 산란에 의한 빛의 세기는 파장의 4제곱에 거꿀비례하며 온도에 관계된다.

하늘이 푸르게 보이는것은 바로 이러한 산란에 의하여 설명된다.

대기속에 있는 공기분자들의 무질서한 열운동에 의하여 태양빛이 전파되는 공간의 모든 점에서 밀도가 균일하지 않아 빛이 산란되는데 파장이 짧을수록 더 세게 산란되므로 푸른색갈의 빛이 세게 산란되여 우리 눈에 들어온다. 그리하여 하늘이 푸르게 보인다.

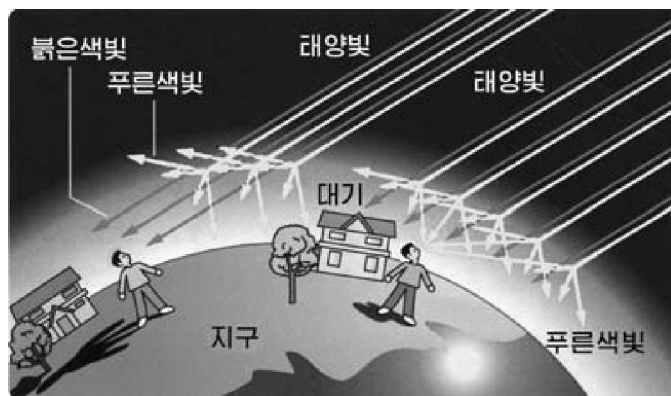



그림 4-27. 하늘이 푸르게 보이며 아침과 저녁 태양빛이 붉게 보이는 리치

그리고 아침이나 저녁에 태양이 낮보다 더 붉게 보이는것은 아침과 저녁에 태양빛이 대기층을 낮보다 더 길게 지나서 우리 눈에 들어오므로 흰색빛중에서 푸른색갈의 빛은 거의다 산란되고

붉은색갈의 빛만 남기때문이다. 그러므로 태양이 붉고 크게 보인다.(그림 4-27)

깨끗한 매질속에 성질이 다른 립자들이 무질서하게 섞여있는 매질을 **흐린 매질**이라고 부른다. 흐린 매질에서는 무질서하게 섞여있는 성질이 다른 립자들이 산란립자의 역할을 한다.

흐린 매질에서 빛의 산란은 산란립자의 크기에 따라 물림새와 법칙성이 다르다.

실험에 의하면 산란립자의 크기가 빛의 파장보다 작은 경우에 산란빛의 세기가 파장의 4제곱에 거꿀비례한다. 이 경우에는 파장이 짧을수록 산란이 더 세게 일어난다.

작은 연기알갱이들이 섞여있는 공기층이나 약간한 량의 우유를 잘 섞은 물그릇속에 흰색빛을 비추고 옆에서 볼 때 푸르스름하게 보이는것은 흰빛가운데서 파장이 짧은 푸른색계통의 빛이 산란되여 눈에 들어오기때문이다.

산란립자의 크기가 빛의 파장보다 큰 경우에는 산란빛의 세기가 파장의 2제곱에 거꿀비례한다. 이 경우에는 파장이 짧은 푸른색계통의 빛뿐아니라 그보다 파장이 긴 빛들이 산란에 기여하는 몫이 커진다.

젖은 나무가 탈 때 나는 연기나 작은 물방울로 된 안개가 푸르게 보이지 않고 희게 보이는 리유가 바로 여기에 있다.

산란립자의 크기가 파장에 비하여 매우 클 때에는 입사빛이 산란중심(산란립자)의 겉면에서 반사 또는 굴절한 결과에 빛이 산란된다.

밤에 자동차가 조명등을 켜고 달릴 때 빛줄기를 볼수 있는것은 공기중에 떠있는 굵은 먼지알갱이들에 의한 산란의 결과이다.

산란립자의 크기가 파장정도인 때는 산란물림새가 에돌이특성을 가진다.

때때로 달 또는 해주위에 그를 중심으로 원둘레모양의 달무리 또는 해무리가 생기는 현상은 공기중에 떠있는 작은 물방울들에 의한 에돌이산란현상이다.

파장이 길수록 에돌이가 심하므로 원둘레모양의 무지개에서 붉은색고리가 제일 바깥에 놓이고 푸른색고리가 안쪽에 놓인다.

문제

1. 다음 글에서 옳고 그른것을 판단하고 그 근거를 밝혀라.
   ㄱ) 깨끗한 매질은 반드시 고른 매질이다.
   ㄴ) 흐린 매질은 반드시 불균일매질이다.
   ㄷ) 빛의 산란은 분산의 특수경우이다.
   ㄹ) 강물이나 바다가 푸른색으로 보이는것은 빛의 산란때문이다.
   ㅁ) 깨끗한 매질속에서도 빛의 산란이 일어난다.
2. 겨울날 입김은 희게 보이지만 여름에는 입김을 볼수 없다. 왜 그런가?
3. 깨끗한 매질에서의 산란이 흐린 매질에서의 산란과 구별되는 중요한 특징은 산란빛의 세기가 온도에 관계된다는것이다. 왜 그런가?

제6절. 렌트겐선

렌트겐설비로 병원에서는 사람의 몸안을 투시해보고 공장에서는 생산된 제품의 질을 검사한다.

렌트겐선이란 무엇이며 어떤 성질을 가지고있는가.

렌트겐선

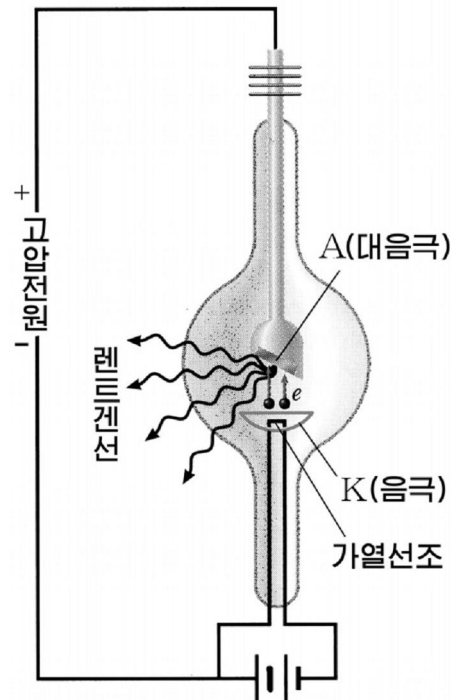
1895년에 도이췰란드의 물리학자 렌트겐은 빠른 전자가 금속겉면에 충돌할 때 특수한 복사선이 나온다는것을 발견하였다.

처음에는 그 복사선이 무엇인지 알지 못하여 《X선》이라고 하였다가 그의 본성이 밝혀진 후 발견한 학자의 이름을 따서 렌트겐선이라고 불렀다.

빠른 전자가 금속겉면에 충돌할 때 나오는 자외선보다 파장이 더 짧은 (10^{-11}～10^{-9}m) 전자기파를 **렌트겐선**이라고 부른다.

렌트겐선은 렌트겐관이라는 특수한 진공관으로 얻는다.(그림 4-28)

그림 4-28. 렌트겐관

렌트겐관에는 음극 K와 대음극(양극) A가 있고 K는 전류가

흐르는 가열선조에 의하여 가열되여 전자를 방출한다.

전자들은 K와 A사이의 센 전기마당의 작용으로 가속되여 큰 속도를 가지고 대음극 A에 부딪친다. 이때 렌트겐선이 복사된다.

렌트겐선은 발견된 후에도 그 본성이 인차 밝혀지지 않았다.

당시 학자들은 렌트겐선도 전자기파일것이라고 생각은 하였으나 실험으로 밝히지는 못하였다. 그것은 렌트겐선의 에돌이를 확인하는데 알맞는 에돌이살창이 없었다는 사정과 관련되여있다.

1912년에 도이췰란드의 학자 라우에가 결정체를 에돌이살창으로 하여 렌트겐선의 에돌이무늬를 얻어냄으로써 렌트겐선도 파동성을 가지며 그 파장은 결정살창의 살창상수정도라는것이 밝혀졌다.(그림 4-29)

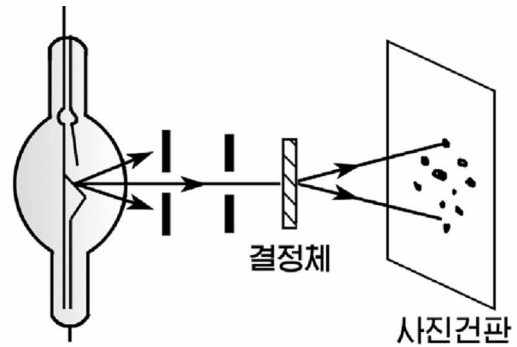



그림 4-29. 렌트겐선에돌이실험

렌트겐선의 성질과 리용

렌트겐선은 파장이 짧은 전자기파로서 다음과 같은 성질을 가진다.

첫째로, 렌트겐선은 물질을 뚫고지나가는 성질이 강하다. 밀도가 작은 물질일수록 잘 통과한다.

둘째로, 렌트겐선은 물질속을 지나면서 원자, 분자들을 이온화시키며 이에 의하여 물질의 화학변화(실례로 사진작용)와 같은 여러가지 변화를 일으킨다.

셋째로, 렌트겐선은 형광작용을 한다. 때문에 형광물질(례하면 백금산시안화바리움 등)에 렌트겐선을 쪼이면 보임빛을 낸다.

넷째로, 렌트겐선은 에돌이와 간섭현상을 일으킨다. 렌트겐선은 파장이 매우 짧으므로 에돌이살창으로 결정살창을 쓴다.

렌트겐선이 물질을 잘 뚫고지나가는 성질을 리용하여 몸안의 구조를 알아내거나 병을 진단하며 제품안에 있는 결함을 알아낸다.

렌트겐선의 사진작용과 형광작용을 리용하여 물체의 내부를 관찰하거나 기록하는데 리용된다.

렌트겐촬영은 렌트겐선의 사진작용을 리용한것이고 렌트겐투시

는 형광작용을 리용한것이다.(그림 4-30)

렌트겐선의 에돌이무늬를 조사하면 결정의 살창구조를 알아낼수 있다. 이것이 **렌트겐선구조분석법**(렌트겐선에 의하여 결정살창구조를 연구하는 방법)의 기초로 된다.

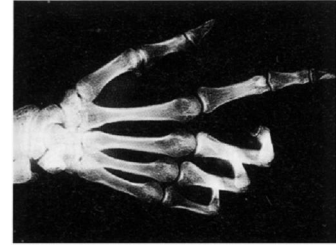



그림 4-30. 렌트겐투시

전자기파의 분류

지금까지 우리가 배운 전자기파는 넓은 파장대역을 차지하며 파장대역에 따라 그 성질들이 꼭 같지 않다.

19세기초에 적외선과 자외선이 발견되였고 막스웰의 전자기리론이 확립된 후 전자기파의 존재가 실험적으로 확인되였다.

빛과 전자기파를 동일시하게 된것은 전파속도가 같고 가로파라는 본질적특성에서 공통점을 가지고있기때문이다. 그후에 렌트겐선, γ선들이 련이어 발견되여 이 모든것들이 전자기파라는것이 밝혀짐으로써 전자기파는 매우 넓은 파장대역을 차지하며 그 형태도 다양하다는것이 알려졌다.

파장에 따라 전자기파의 복사방법과 성질이 달라진다.

이에 따라 전자기파를 라지오파, 적외선, 보임빛선, 자외선, 렌트겐선, γ선으로 나눈다.(그림 4-31)

라지오파는 진동회로에서 전기진동에 의하여, 적외선과 보임빛선, 자외선은 원자들의 바깥층전자들의 운동에 의하여, 렌트겐선은 빠른 전자들이 갑자기 멎거나 원자의 아낙층전자의 상태가 변할 때, γ선은 원자핵들이 변할 때 나온다.

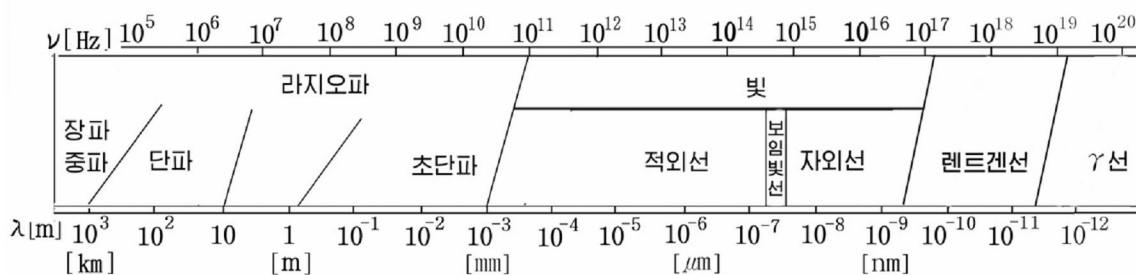



그림 4-31. 전자기파의 분류

문제

1. 렌트겐선을 전자기파로 볼수 있는 근거를 렌트겐선의 복사과정

으로 설명하여라.

2. 빛의 에돌이살창으로는 렌트겐선의 에돌이를 관찰할수 없다. 그 리유를 설명하여라.
3. 빛이 전자기파라는 근거는 무엇인가?

일화 첫 노벨물리학상을 받은 렌트겐

음극선관을 가지고 실험하던 영국학자 쿠룩스를 비롯한 많은 학자들은 실험실에 보관해둔 사진필림이 흐리여 못쓰게 되는 경우를 자주 당하였는데 그때마다 필림을 불량품이라고만 생각하였다. 같은 시각 도이췰란드학자 렌트겐도 음극선관으로 실험하다가 같은 현상들을 목격하였으나 그저 스쳐지나지 않았다.

어느날 음극선관에서 나오는 빛이 실험을 방해하는것을 막기 위하여 그것을 검은 종이로 감고 실험실을 캄캄하게 만든 후 거기에 높은 전압을 걸어주었을 때였다. 음극선관으로부터 약간 떨어진 형광판에서 빛이 나오는것이였다. 이것을 발견한 렌트겐은 분명 보이지 않는 그 《무엇》이 형광판에 작용하여 빛을 내게 하는것이 틀림없다고 생각하였다. 그후 8주일동안 실험을 거듭하는 과정에 음극선관에서 투과력이 센 알지 못할 복사선이 나오는것으로 판단하고 이것을 《X선》이라고 불렀다.

렌트겐에 의한 X선의 발견은 원자물리학, 공학, 의학발전에 큰 공헌으로 되였으며 렌트겐은 1901년에 첫 노벨물리학상을 받았다.

렌트겐의 공적을 기념하기 위하여 사람들은 그후 X선을 《렌트겐선》이라고 불렀다.

제7절. 찬 빛

찬빛이란 무엇인가

빛은 가열된 물체에서만 나오겠는가.

백열전등의 가열선조에 전류가 흐르면 가열선조가 뜨거워지면서 빛을 내는것을 보게 된다.

그러나 반디불이나 야광문자판은 가열되지는 않지만 빛을 낸다.

이처럼 물질을 가열하지 않아도 내는 빛을 **찬빛**이라고 부르며 찬빛을 내는 물질을 **찬빛물질**이라고 부른다.

찬빛물질이 찬빛을 내자면 외부에서 에네르기를 받아야 한다.

외부에서 찬빛물질에 주는 에네르기의 형태와 방법에 따라서 찬빛을 여러가지로 갈라볼수 있다.

외부에서 빛을 받아 찬빛을 내는것을 **빛에 의한 찬빛**이라고 부른다. 콤팍트등은 유리관안벽에 얇게 발라놓은 찬빛물질에 눈에 보이지 않는 빛을 비쳐줄 때 흰색의 찬빛을 내보낸다.

가속된 전자나 방사선립자와 같은 빠른 립자들이 찬빛물질과 부딪칠 때 나오는 찬빛을 **전자선에 의한 찬빛**이라고 부른다.

렌트겐선이나 γ선을 찬빛물질에 쪼여줄 때에 나오는 찬빛을 **렌트겐선에 의한 찬빛**이라고 부른다.

찬빛물질에 전기마당을 걸어주었을 때에도 찬빛이 나오는데 이것을 **전기찬빛**이라고 부른다. 네온이나 아르곤 같은 기체를 넣은 유리관의 두끝에 전극을 설치하고 전기마당을 만들어주면 전기찬빛이 나온다.

이밖에도 화학찬빛, 생물찬빛, 마찰찬빛이 있다.

찬빛은 발광지속시간에 따라 **형광**과 **린광**으로 나눈다. 형광은 외부작용이 없어지면 찬빛복사도 인차 없어지는 찬빛을 말하며 린광은 외부작용이 없어져도 찬빛복사가 오래동안 지속되는 찬빛을 말한다.

찬빛의 성질과 리용

? 형광과 린광의 복사특성은 어떤 차이를 가지는가.

형광은 높은 에네르기를 가지는 상태에 올랐던 전자가 즉시에 낮은 에네르기를 가지는 상태로 이행하면서 내는 빛이지만 린광은 높은 에네르기를 가지는 상태에 올랐던 전자들이 약간 낮은 에네르기를 가지는 상태에 떨어진 다음 오래동안 그 상태를 유지하면서 낮은 에네르기를 가지는 상태로 떨어질 때 내는 빛이다.

형광인 때에는 원자가 높은 에네르기를 가진 상태에 10^{-8}s정도 머물러있는다. 실례로 석유에 해빛이 비치면 연한 푸른색의 형광빛(찬빛)이 나오지만 해빛을 없애면 이러한 형광빛을 볼수 없다.

린광인 때에는 원자가 높은 에네르기를 가진 상태를 10^{-4}s～수 min정도로 상대적으로 길게 유지한다.

조명용광원으로 쓰이고있는 콤팍트등은 찬빛을 내보낸다. 콤팍트등이 내보내는 빛색은 해빛에 가까우며 밝으면서도 눈이 부시지

않는다. 또한 소비하는 전기에네르기의 거의 전부가 빛으로 전환되기때문에 전기를 절약하는데서 매우 유리하다. 콤팍트등은 기체방전관의 안벽에 형광을 내보내는 찬빛물질을 얇게 발라서 만들었다. 고주파전자회로에 의하여 기체방전을 쉽게 일으키며 방전관이 방전할 때 나오는 자외선이 찬빛물질과 충돌하여 찬빛을 낸다.

찬빛등은 사람들의 건강증진에 필요한 자외선을 얻는데도 리용된다. 280～315nm의 파장대역에 속하는 중간파장의 자외선은 피부에 작용하여 비타민 D를 형성시키는것과 같은 좋은 효과를 준다.

찬빛은 적외선, 자외선, 렌트겐선, 방사선의 관측에 리용된다. 실례로 세시움을 약간 섞어 만든 석영유리에 자외선을 쪼이면 하늘색찬빛을 내는데 그 세기가 쪼여주는 자외선의 세기에 관계되므로 자외선의 세기를 알아낼수 있다.

찬빛에 의한 물질분석은 미량원소분석에서 매우 효과적이다. 찬빛분석은 매우 높은 감도를 가지므로 물질속에 포함되여있는 매우 적은 량의 찬빛물질도 밝혀낼수 있다.

찬빛분석은 또한 의학, 생물학, 식료공업, 원유탐사 등에도 널리 리용된다.

문제

1. 찬빛을 얻기 위하여 찬빛물질에 쪼여주는 에네르기에는 어떤것들이 있는가?
2. 렌트겐투시와 렌트겐찬빛은 호상 어떤 관계에 있는가?

제8절. 레이자

위대한 령도자 **김정일**대원수님께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《과학연구사업을 더욱 강화하여 세포공학과 유전자공학, 초고압물리학, 극저온물리학을 발전시키며 레이자와 플라즈마기술, 원자에네르기와 태양에네르기를 개발하여 인민경제에 받아들이는데서 나서는 과학기술적문제를 적극 풀어나가야 하겠습니다.》

레이자는 1950년대에 개발되여 매우 빨리 발전하고있는 최신과학기술의 한 분야로서 현대과학과 기술, 생산발전에서 커다란 역할을 놀고있다.

레이자란 강제복사에 의한 빛의 증폭이라는 영문자의 략어인데

레이자빛은 인공적으로 얻어내는 세기가 강한 단색빛을 의미한다.

레이자빛이 나오는 원리

원자는 높은 에네르기를 가진 상태에서 낮은 에네르기를 가지는 상태로 내려갈 때 빛을 내보낸다. 그런데 이 원자들은 제가끔 빛을 내보내므로 그것들이 내보내는 빛의 진동수, 자리각, 진동방향, 전파방향이 서로 다르다.(그림 4-32) 이런 빛복사를 **자발복사**라고 부른다. 이런 빛은 간섭을 일으키지 못한다.

그림 4-32. 보통광원에서 빛이 생기는 과정

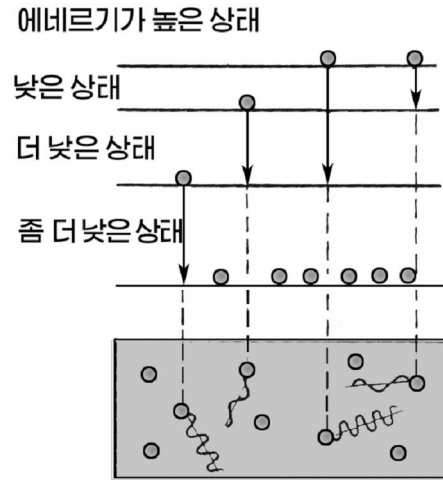
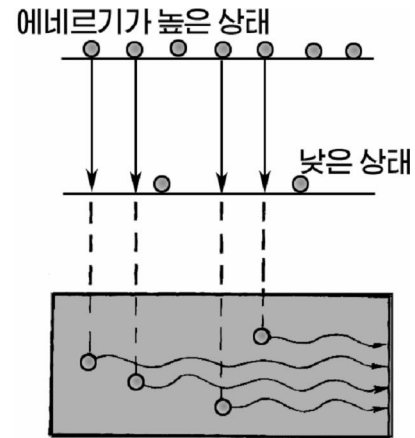
그러나 레이자광원에서는 이와 다르다. 레이자광원을 이루는 물질의 내부구조는 보통광원을 이루는 물질과 다르기때문에 원자들은 높은 에네르기상태에 오래동안 머물러있을수 있으며 이러한 상태를 가진 원자들이 상당히 많을수 있다.

이런 물질에 밖에서 에네르기를 주면 많은 원자들이 높은 에네르기상태로 올라간다. 이 원자들가운데서 하나가 낮은 에네르기상태로 내려가면서 빛을 내면 이 빛이 높은 에네르기상태에 있는 다른 원자를 건드려 강제로 아래상태로 또 내려가게 한다.(그림 4-33)

그림 4-33. 레이자광원에서 빛이 나오는 원리

이때 나오는 빛은 원자를 건드린 빛과 진동수, 자리각, 진동방향, 전파방향이 다 같다. 이 두 빛은 각각 또 다른 원자를 건드려 꼭같은 빛을 내게 한다. 이런 과정에 빛이 급격히 세진다.

이처럼 높은 에네르기상태에 있던 원자들이 스스로가 아니라 외부작용(빛)을 받아 낮은 에네르기상태로 떨어지면서 빛을 내보내는 현상을 **강제복사**라고 부른다.

강제복사에 의하여 나오는 빛들은 같은 방향으로 나가며 진동

수, 자리각, 진동방향이 같으므로 간섭을 일으킬수 있다.

강제복사에 의한 빛이 세지려면 높은 에네르기상태에 있는 원자수가 낮은 상태에 있는 원자수보다 늘 많아야 한다. 이런 성질을 가진 물질을 **레이자물질**이라고 부른다. 레이자는 레이자물질의 종류에 따라 기체레이자, 액체레이자, 고체레이자, 반도체레이자로 나눈다.

빛을 더 세게 하기 위하여 레이자물질의 량쪽에 빛선에 수직되게 반사거울을 놓는다. 빛들은 반사거울사이를 왔다갔다 하면서 높은 에네르기상태에 있는 원자들을 계속 건드려 빛을 내게 한다.(그림 4-34)

두 반사거울가운데서 하나를 반투명거울(빛의 일부만 반사시키고 일부는 통과시키는 거울)로 하면 빛의 일부가 그것을 통해 밖으로 나온다. 이 빛이 **레이자빛**이다. 이런 과정이 지속되게 하자면 밖에서 에네르기를 련속 주어 원자들을 계속 높은 에네르기상태에 올려놓아야 한다.

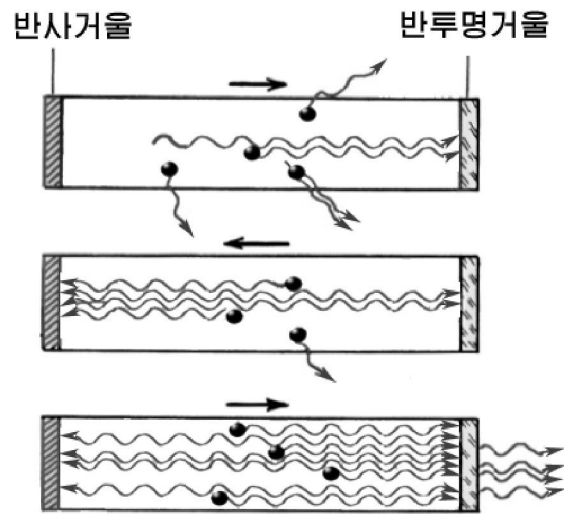



그림 4-34. 레이자빛이 세지는 원리

레이자의 리용

레이자빛은 보통빛과는 특별히 다른 성질을 가지고있으므로 보통빛으로 할수 없는 일들을 할수 있다.

레이자빛은 간섭을 잘 일으키는 단색빛이므로 간섭이나 에돌이를 쉽게 실현시킬수 있다. 그러므로 정밀측정, 레이자통신, 레이자탐지에 쓰인다.

또한 레이자빛은 빛묶음이 가늘지만 빛흐름이 대단히 크므로 그것으로 굳은 물질에 구멍을 뚫거나 인체수술도 할수 있다.

지금은 레이자무기까지 만들고있다.

레이자무기는 레이자빛을 리용하여 적의 유생력량을 소멸하며 군사장비나 전투기술기재를 파괴하는데 쓰이는 무기이다.

이 무기로 레이자빛을 쪼이면 시력을 잃게 하거나 옷을 불태워 화상을 입힘으로써 비교적 가까운 거리에 있는 유생력량을 소멸할수 있다.

또한 레이자무기는 전투기술기재의 전자장치, 광학정찰기구, 통신기재, 추종체계 등을 파괴하거나 자기 성능을 나타내지 못하게 만든다. 출력이 높은 레이자무기는 비행기, 땅크, 장갑차, 자동차를 비롯한 여러가지 목표를 녹여버린다.(그림 4-35)

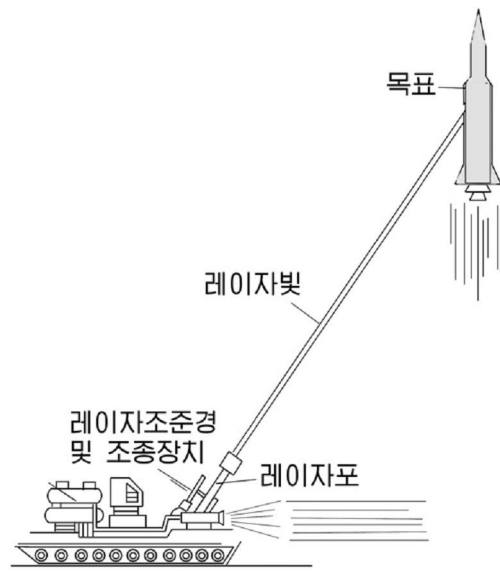



그림 4-35. 레이자포

문제

1. 자발복사와 강제복사의 차이점은 무엇인가?
2. 레이자빛은 왜 간섭성을 가지는가?

자료 해양에서 레이자의 리용

레이자빛은 꼭같은 파장으로 되여있고 빛의 세기를 충분히 세게 집중시킬수 있으므로 바다물속에서 멀리 앞을 비칠수 있다.

그러므로 레이자는 바다속에서의 정보전달에 매우 효과적이다. 지금까지 바다물속에서의 정보전송에는 소리파, 초음파나 케블에 의한 통신을 주로 하였고 전자기파로 쓰는 경우에는 극히 낮은 주파수의 전자기파를 써왔다. 그런데 소리파나 초음파는 레이자에 비하여 전파속도가 훨씬 뜨고 전송되는 정보의 용량이 작으며 유선통신인 경우에는 케블을 늘이기 곤난하다.

레이자를 리용하여 정보전달을 하면 많은 량의 정보를 얻을수 있으며 전송시간도 단축되고 케블선도 필요없게 된다.

복습문제(1)

1. 방안에 두 전등을 켜놓으면 두 전등에서 나온 빛이 중첩된다. 그런데도 벽에서 간섭무늬를 찾아볼수 없는것은 무엇때문인가?
2. 두개의 실틈에 의한 간섭실험에서 두 실틈사이의 간격은 0.1cm이고 실틈으로부터 비춤판까지의 거리는 3m이다. 첫 3개의 밝은 무늬의 자리를 구하여라. 빛의 파장은 $\lambda=600$nm이다.

   (답. 1.8mm, 3.6mm, 5.4mm)
3. 서로 0.02cm 떨어진 두개의 실틈에 의하여 그로부터 1.3m 떨어진 비춤판우에 간섭무늬가 나타났다. 비춤판우에 생긴 린접한 무늬사이간격이 0.32cm라면 비쳐준 빛의 파장은 얼마인가?

   (답. 492.3nm)
4. 에돌이무늬는 간섭무늬와 어떤 관계에 있는가?
5. 나트리움원자에서 나오는 빛($\lambda=589$nm)을 에돌이살창에 수직으로 쪼였더니 3차극대가 $10°11'$에 나타났다. 이 살창에 어떤 빛을 쪼였더니 2차극대가 $6°16'$의 방향에 생겼다면 이 빛의 파장은 얼마인가? (답. 546nm)
6. 에돌이살창에 흰색빛이 수직으로 들어갈 때 파장이 660nm인 붉은색빛의 두번째 밝은 띠는 어떤 색의 몇번째 밝은 띠와 겹치겠는가?

   (답. 440nm의 남색빛의 세번째 밝은 띠)
7. 살창상수가 0.5mm인 에돌이살창을 눈에 대고 실틈방향에 평행되게 5m 떨어진 거리에 있는 직선광원을 보았더니 린접한 두 밝은띠사이의 거리가 6mm였다. 빛의 파장을 구하여라.

   (답. 600nm)
8. 1mm 너비에 100개의 틈이 있는 에돌이살창을 거쳐 1m앞에 있는 불이 켜진 작은 전등을 보아라. 살창의 중심으로부터 살창면방향으로 11cm 되는 거리에는 어떤 색갈의 빛이 보이겠는가?

   (답. λ=550nm인 풀색빛)
9. 살창상수가 $d=2\times10^{-4}$cm인 에돌이살창에 빛을 수직으로 쪼인다. 이때 비춤판에 얻어진 1차스펙트르에서 $\lambda_1=577$nm

인 빛과 λ_2 =579.1nm인 빛은 서로 얼마의 거리에 떨어져있는가? 렌즈의 초점거리는 0.6m이다. (**답.** 0.63mm)

10. 대체로 밤에 두 자동차가 마주올 때 운전수들은 엇바꾸어가면서 조명등을 껐다켰다한다. 왜 그렇게 하는가? 빛쏠림판을 리용하면 이렇게 하지 않아도 된다. 어떻게 하면 되겠는가?

11. 어떤 투명한 물질로부터 공기로 나가는 경계면에서 전반사의 림계각이 45°이다. 이 물질의 겉면에서 빛이 반사할 때 브류스터각은 얼마인가? (**답.** 54° 44′)

12. 투명평행평판의 한쪽면으로부터 브류스터각으로 빛이 입사할 때 평행평판의 다른쪽 경계면에서의 굴절각은 그 면에서의 브류스터각으로 된다는것을 증명하여라.

13. 창문유리를 지나는 흰빛은 왜 여러 성분으로 갈라지지 않는가?

14. 적외선사진이 보통사진에 비하여 우월한 점은 무엇인가?

15. 안개가 낀 날에 앞을 가려보기 힘든것은 무엇때문인가?

16. 렌트겐관에서 양극전압이 100kV일 때 음극에서부터 양극에 도달하는 전자의 운동에네르기는 얼마인가?

(**답.** 1.6×10^{-14} J)

17. 렌트겐관의 양극에 도달하는 전자들의 속도가 1.2×10^5km/s이다. 렌트겐관에 걸린 양극전압은 얼마인가?

(**답.** 약 41kV)

18. 콤팍트등으로 전류가 흐를 때 어떻게 되여 유리관안벽에 바른 형광물질에서 빛이 나오게 되는가를 설명하여라.

19. 레이자빛이 자연빛과 다른 점은 무엇인가?

20. 홍보석레이자발진기에서는 센 빛을 내는 크세논등으로 홍보석을 비쳐준다. 왜 그렇게 하는가? 홍보석레이자빛의 파장이 694.3nm라면 진동수는 얼마인가? (**답.** 4.32×10^{14} Hz)

복습문제(2)

1. 양그의 실험에서 흰색광원을 쓰고 실틈 S_1과 S_2의 바로 뒤에 색이 다른 유리판들을 놓으면 비춤판에 간섭무늬가 생기는가?

2. 비춤판으로부터 광원까지의 거리가 3.2m이고 비춤판의 중심으로

부터 28mm 거리에 있는 점에 세번째 어두운 무늬가 생겼다. 빛의 파장이 560nm라면 두 광원들사이거리는 얼마인가?

(답. 224μm)

3. 유리평판 두개를 겹쳐놓고 한쪽 기슭에 얇은 종이를 끼우면 유리판사이에 쐐기모양의 공기층이 생긴다. 여기에 빛을 수직으로 내려비추면 밝은 띠, 어두운 띠가 평행으로 번갈아 나타난다. 이것은 쐐기모양의 공기층웃면과 유리가 접촉한 면에서 반사된 빛과 공기층아래면과 유리가 접촉한 면에서 반사된 빛이 겹치여 간섭무늬를 만들기때문이다. 파장이 520nm인 빛을 비추었더니 평행띠들사이의 간격이 0.52mm였다면 두 유리평판사이의 각은 얼마인가?

(답. 1′ 44″)

4. 얇은 비누물막에 흰색빛이 수직으로 비쳐진다. 웃면과 아래면에서 반사된 빛이 간섭하여 파장이 600nm인 빛이 제일 밝게 보이고 450nm인 빛이 제일 어둡게 보인다. 비누물막의 두께는 얼마인가? 비누물막의 굴절률은 약 4/3이다.

(답. 337.5nm)

5. 유리판에 1mm마다 420개의 선을 그은 에돌이살창에 수직으로 어떤 단색빛을 비쳤을 때 30° 방향에 2차극대가 생겼다. 이 빛의 파장은 얼마인가?

(답. 595.2nm)

6. 살창상수가 2×10^{-3}cm인 실틈에 수직으로 파장이 5×10^{-5}cm인 단색빛이 입사한다. 실틈으로부터 1m 떨어진 비춤판우에 생긴 실틈의 영상의 너비를 구하여라. 실틈영상의 너비를 중심극대량쪽에 놓이는 극소사이거리로 보아라.

(답. 2.5cm)

7. 어떤 투명한 물질의 브류스터각이 전반사림계각의 값과 같다. 이 물질의 굴절률을 구하여라.

(답. 1.272)

8. 빛이 공기로부터 물결면에 54° 의 각으로 입사한다. 이때 반사

빛이 완전쏠림빛이라면 굴절각은 얼마인가? (답. 약 36°)

9. 자연빛이 반사되여 완전쏠림빛으로 되였을 때 반사빛선과 굴절빛선사이의 각은 얼마인가? (답. 90°)

10. 진공속에서 진동수가 5×10^{14}Hz인 감색빛의 파장은 얼마인가? 이 빛이 굴절률이 1.5인 유리속으로 들어갈 때의 전파속도와 파장을 구하여라.

(답. 600nm, 2×10^{8}m/s, 400nm)

11. 굴절률이 빛의 파장에 따라 달라지는것은 무엇때문이겠는가를 생각하여보아라.

12. 물에서 붉은색빛의 파장은 공기중에서 풀색빛의 파장과 같다. 만일 물을 붉은색빛으로 비쳤다면 물밑에 있는 사람은 어떤 색갈의 빛으로 보이겠는가?

13. 교통안전, 운수수단 등에서는 왜 위험신호를 붉은색으로 하는가?

14. 우리는 때때로 저녁에 달주위에 원둘레모양의 달무리가 생기는것을 볼수 있다. 그러면 다음날 날씨가 좋지 않을것이라고 말한다. 왜 그런가?

15. 폭포수는 희게 보이는데 폭포수밑의 물은 푸르게 보이는것은 무엇때문인가?

16. 50kV의 전압에서 동작하는 렌트겐선관의 양극에 도달하는 전자들의 운동속도는 얼마인가?

(답. 약 1.3×10^{8}m/s)

17. 라지오파, 적외선, 보임빛선, 자외선, 렌트겐선, γ선이 가지고있는 공통적인 특징은 무엇인가? 이것들이 복사되는 과정에서는 어떤 차이가 있는가?

18. 찬빛을 내는 물질에 적외선을 작용시켜 보임빛을 나오게 할수 있는가?

19. 어떤 홍보석레이자발진기에서 1cm^2의 자름면적을 통하여 0.5ms동안에 10J의 빛에네르기를 복사한다. 이 레이자발진기의 출력을 구하여라.

(답. 20kW)

제5장. 원자구조와 물질의 2중성

우리가 일상생활에서 만나게 되는 거시세계에서는 물질이 립자이거나 파동으로서의 한가지 성질만을 나타내지만 원자세계와 같은 미시세계에서는 물질이 립자성과 파동성을 다같이 뚜렷이 나타낸다. 그리고 물리적량들은 띠염띠염 떨어진 불련속적인 값들을 가진다.

이 장에서는 빛량자를 가정하여 빛전기현상을 설명한데 기초하여 원자의 미시적구조는 어떠하며 모든 물질립자는 2중성을 가지고있다는데 대하여 학습한다.

제1절. 빛전기현상

빛전기현상과 그 법칙성

빛이 쪼여질 때 금속겉면으로부터 전자가 튀여나오는 현상을 **빛전기현상**이라고 부른다.

그림 5-1에서 보여준 빛전자관안에 설치된 두개의 전극들중의 하나에 빛을 쪼여주면서 빛을 받는 전극이 음극이 되도록 전지를 련결하면 회로에는 전류가 흐르게 된다. 이것은 금속전극에 빛을 쪼일 때 －부호로 대전된 립자 즉 빛전자가 떨어져나왔다는것을 의미한다.

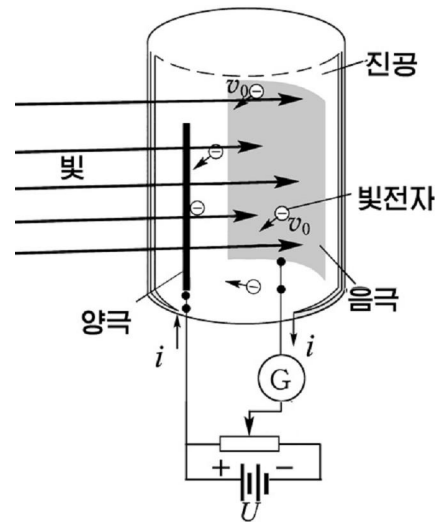



그림 5-1. 빛전기현상실험

빛전기현상은 어떤 법칙에 따르는가.

먼저 쪼여주는 빛의 흐름과 튀여나오는 빛전자의 수와의 관계를 따져보자. 빛의 흐름은 전등을 빛전자관에 가까이 가져가는 방법으로 변화시킬수 있다. 그리고 전류의 세기는 빛전자의 수에 비례하므로 전류의 세기를 알면 빛전자의 수를 알수 있다.

이 실험에 의하면 전류의 세기는 빛흐름에 비례한다. 이것은 단위시간동안에 튀여나오는 빛전자의 수가 빛흐름에 비례한다는것을 말해준다.

다음으로 빛의 진동수를 변화시키면서 빛전자의 수가 어떻게 변하는가를 따져보자. 그러자면 각이한 색을 가지는 빛을 빛전자관의 음극에 쪼여주면서 전류의 세기를 재야 한다.

이 실험에 의하면 빛의 진동수가 어떤 값보다 더 작아지면 빛흐름이 아무리 세도 빛전자는 전혀 튀여나오지 않는다.

진동수 ν_0 보다 낮은 진동수를 가지는 빛을 쪼여줄 때 금속걸면으로부터 전자가 떨어져나오지 않는다고 하면 ν_0 을 **한계진동수**(또는 **림계진동수**)라고 부른다.

다음으로 튀여나오는 빛전자의 최대운동에네르기가 빛의 진동수와 어떻게 관계되는가를 보자.

빛전자관의 두 전극에 거꿀전압 U 를 걸어주어 빛전자의 운동을 방해하는 전기마당을 발생시키면 빛전자가 전기마당속에서 운동에네르기를 잃게 된다. 만일 음극에서 나온 빛전자들가운데서 운동에네르기가 가장 큰것에 대하여

$$\frac{mv_{최}^2}{2} < eU$$

로 된다면 양극까지 도달하는 빛전자는 없게 된다. $U = U_0$ 일 때 $I = 0$ 으로 된다면

$$\frac{mv_{최}^2}{2} = eU_0$$

으로 된다. 여기서 $v_{최}$ 는 빛전자의 최대운동속도이다. 그러므로 거꿀전압 U_0 을 재면 빛전자의 최대운동에네르기를 알수 있다.

이 실험에 의하면 빛의 진동수가 클수록 빛전자의 최대운동에네르기가 크다.

또한 실험을 통하여 빛전기현상이 일어날 때 빛전자는 빛을 쪼여주면 거의 순간적으로 금속으로부터 튀여나온다는것을 알수 있다.

실험으로 얻은 빛전기현상에 대한 법칙은 다음과 같다.

첫째로, 단위시간동안에 튀여나오는 빛전자의 수는 빛흐름에 비례한다.

둘째로, 빛의 진동수가 어떤 값보다 작으면 빛흐름이 아무리 세도 빛전자는 튀여나오지 않는다.

셋째로, 빛의 진동수가 클수록 빛전자의 최대운동에네르기가 커진다.

넷째로, 빛을 쪼일 때 빛전자는 거의 순간적으로 튀여나온다.

빛전기현상에 대한 파동론적해석의 난점

빛은 전자기파이므로 그것을 금속에 쪼일 때 금속안의 자유전자들은 전자기마당의 작용을 받아 진동할것이다. 만일 빛이 충분히 세기만 하면 그 빛의 진동수가 어떤 값을 가지든 관계없이 전자의 진폭이 커져서 금속겉면밖으로 튀여나오게 될것이다.

그러나 빛전기현상에서는 빛의 진동수가 한계진동수보다 작은 경우에는 아무리 센 빛을 쪼여주어도 그리고 아무리 오랜 시간 빛을 쪼여주어도 금속겉면으로부터 전자가 튀여나오지 않는다.

실험에서는 빛이 세지 않아도 한계진동수보다 높은 진동수를 가지는 빛을 쪼여줄 때에는 빛전자가 떨어져나온다는것을 보여주었다. 이러한 사실은 빛이 파동성만을 가진다고 생각하여서는 설명되지 않는것이다.

빛전기현상에서 빛의 파동성으로 설명되지 않는 다른 한가지 사실은 이 현상이 빛을 쪼이자마자 일어난다는것이다.

파동리론에 의하면 빛의 세기가 약할 때에는 빛을 오랜 시간동안 비쳐주어야만 금속안의 전자가 충분한 에네르기를 얻어 금속밖으로 튀여나올수 있다. 그러나 실제적으로 빛전기현상에서는 빛의 세기가 약하든 세든 관계없이 금속겉면에 쪼여주는 빛의 진동수가 한계진동수보다 높기만 하면 거의 순간적으로 빛전자가 발생된다.

<u>빛이 파동성만을 가진다고 생각하여서는 빛전기현상에서 한계진동수가 존재한다는 사실과 빛전자가 거의 순간적으로 튀여나온다는 사실을 설명할수 없다.</u>

문제

1. 금속겉면에 빛을 쪼일 때 왜 전자가 튀여나온다고 생각하는가?
2. 빛이 파동성만을 가진다고 생각한다면 빛전기현상에서 어떤 실험적사실들을 설명할수 없는가?
3. 다음의 문장들에서 옳은 점과 틀린 점을 찾아내여라.
   ㄱ) 빛전자관의 음극에 쪼여주는 빛흐름을 일정한 값으로 유지하면서 전압을 점점 높여주면 전류의 세기는 계속 커진다.
   ㄴ) 붉은색유리를 통하여 음극에 빛을 쪼일 때보다 푸른색유리

를 통하여 빛을 쪼이면 음극에서 튀여나오는 빛전자의 속도가 더 커진다.

제2절. 빛 량 자

빛량자가정

물체가 빛을 복사하거나 흡수하는 현상을 연구하면서 물리학자 플랑크는 새로운 가정을 내놓았다. 플랑크는 물체가 빛을 복사하거나 흡수할 때 빛은 련속적으로가 아니라 일정한 에네르기덩어리를 단위로 하여 복사하거나 흡수한다고 가정하였다. 그리고 복사나 흡수의 단위로 되는 에네르기덩어리를 에네르기량자라고 하고 에네르기량자는 $E=h\nu$ 와 같다고 하였다. 여기서

$$h=6.63\times10^{-34}\ \mathrm{J\cdot s}$$

이며 **플랑크상수**라고 부른다.

아인슈타인은 플랑크의 량자가설에 기초하여 빛전기현상을 살펴보면서 빛이 물질과 작용할 때 진동수가 ν 인 빛을 마치 에네르기가 $h\nu$ 인 립자들의 모임처럼 생각할수 있다고 가정하였다.

에네르기가 $h\nu$ 인 빛립자를 **빛량자**라고 부른다.

빛량자의 에네르기는

$E=h\nu=\hbar\omega \quad (\hbar=h/2\pi)$ 빛량자의 에네르기

이며 빛량자의 운동량은

$P=\dfrac{E}{c}=mc=\dfrac{h\nu}{c}=\dfrac{h}{\lambda}$ 빛량자의 운동량

빛량자에 의한 빛전기현상설명

아인슈타인의 빛량자가정에 의하여서는 빛전기현상이 잘 설명된다.

❓ 그러면 빛량자가정에 기초하여 빛전기현상을 어떻게 설명할수 있겠는가.

금속겉면에서 전자를 떼내기 위해서는 방출일만 한 일을 하여야 한다.

몇가지 물질의 방출일

원소	방출일 [eV]
알루미니움	4.3
탄소	5.0
동	4.7
금	5.1
니켈	5.1
석영	4.8
은	4.3
나트리움	2.7

에네르기 $h\nu$ 를 가진 빛량자가 금속겉면에 있는 전자와 충돌할 때에는 자기의 에네르기를 전자에 모두 넘겨준다.

빛량자의 에네르기를 흡수한 전자가 금속겉면에서 튀여나올 때에는 방출일 A 만한 에네르기를 소비한다.

그러므로 $h\nu$ 만 한 에네르기를 가지는 한개의 빛량자에 의하여 튀여나온 빛전자의 운동에네르기는

$$E_e = h\nu - A \ (\geq 0)$$

로 된다.(그림 5-2)

이 식은 다음과 같이 적을수 있다.

$$E_e = \frac{mv^2}{2} = h(\nu - \nu_0) \qquad \left(\nu_0 = \frac{A}{h}\right)$$

여기서 m은 전자의 정지질량이며 v 는 떨어져나온 전자의 운동속도이다.

빛전기현상이 일어나자면 빛량자를 흡수한 전자의 에네르기가 방출일보다 커야 한다. 즉 빛의 진동수 ν 가 $\nu_0 = \dfrac{A}{h}$ 보다 커야 한다. 그러므로 이 진동수보다 낮은 진동수를 가진 빛은 아무리 오랜 시간 쪼여주어도 즉 $h\nu_0$ 보다 낮은 에네르기를 가지는 빛량자는 아무리 많아도 빛전자를 발생시킬수 없다.

그림 5-2. 빛량자에 의한 빛전기현상설명

이것은 빛량자가정에 의하여 파동론적으로 해석되지 않던 한계진동수의 존재문제가 잘 설명된다는것을 의미한다.

다른 한편 빛을 빛량자들의 모임으로 보면 빛이 전자에 쪼여지는 현상은 빛량자가 개별적인 전자와 호상작용하는 과정으로 된다. 이때 금속겉면의 전자는 빛량자의 에네르기를 매우 빨리 흡수한다.

그러므로 빛량자의 에네르기가 $h\nu_0$ 보다 크다면 빛량자의 에네르기를 흡수한 전자는 금속으로부터 거의 순간적으로 튀여나오게 된다.

이것은 빛전기현상에서 빛전자가 빛을 쪼여주자마자 순간적으로 튀여나오는 문제도 빛량자가정에 의하여 원만히 설명된다는것을 말한다.

빛의 2중성

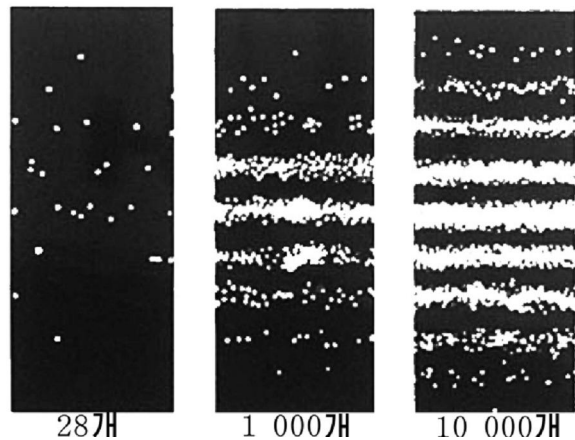
파동으로만 알고있던 빛이 빛량자라는 립자들의 흐름이라는것을 보여준 실험적사실은 빛이 파동성과 함께 립자성도 가지고있다는것을 말하여준다.

빛이 립자성과 파동성을 다같이 띤다는 사실은 어떤 의미를 담고있는가.

두 실틈을 통하여 빛을 입사시킬 때 간섭무늬가 얻어지는 실험을 통하여 살펴보자.

한개의 빛량자라고 생각할수 있는 세기가 아주 약한 빛을 두 실틈을 통하여 순차적으로 입사시킨다. 이때 빛을 수감한 감광판에서는 개별적인 빛량자 하나하나씩의 흔적을 찾아볼수 있다.

그림 5-3에서 흰 점은 빛량자가 감광판에 닿은 흔적이다. 이것은 빛의 립자성을 똑똑히 보여주고있다.

그림 5-3. 빛량자의 흔적

그렇다면 이 경우에 빛이 파동성을 띤다는것은 무엇을 의미하는가에 대하여 보자.

빛이 두 실틈을 통과한 후 감광판의 어디에 빛량자흔적이 나타나겠는가 하는것은 예측할수 없다. 그러나 많은 흔적이 이루어지는 경우에 그 배치에서는 법칙성이 있다는것을 알수 있다. 많은 흔적이 이루어지는 경우에 흔적이 조밀하게 생기는 위치들은 바로 파동

이 두 실틈을 지난 후 간섭될 때 진폭이 커지는 부분과 일치한다. 이것은 흔적들의 전체적인 모임은 파동법칙의 지배를 받는다는것을 말한다. 다시말하여 흔적들의 전체 모임은 파동이 입사한 경우와 같은 간섭무늬를 준다.

빛이 파동성을 띤다는것은 바로 이런 의미를 두고 말하는것이다.

우와 같은 사실들은 빛은 일반적으로 립자성과 파동성을 다 띠고있다는것을 보여준다.

이와 같이 빛이 파동성과 립자성을 다같이 가지고있는 성질을 **빛의 2중성**이라고 부른다.

※ 빛의 파동성은 진동수와 파장으로 특징지어지며 립자성은 빛량자의 에네르기와 운동량으로 특징지어진다.

빛이 2중성을 띤다는것은 빛이 물질과 호상작용할 때에는 개별적인 립자(빛량자) 하나하나씩과 같이 작용하지만 이러한 작용의 전체적인 결과는 파동이 작용한것과 같다는것을 의미한다.

문제

1. 빛량자가정에 의하여 빛전기현상이 어떻게 설명되는가?

2. 파장이 0.122μm인 자외선의 빛량자의 에네르기를 구하여라.

3. 다음의 문장들에서 옳은 점과 틀린 점을 찾아내여라.

ㄱ) 빛이 물질에 흡수될 때에는 빛의 에네르기가 련속적으로 물질에 넘어간다.

ㄴ) 빛량자 한개가 두 실틈을 통과하여 감광판에 남긴 흔적은 파동이 통과하여 남긴 흔적과 같다.

ㄷ) 금속에서 전자는 빛량자의 에네르기를 흡수하고 거의 순간적으로 금속밖으로 튀여나온다.

제3절. 라자포드의 원자모형

라자포드의 산란실험

전자가 발견되고 온도를 높이거나 빛을 쪼일 때 물질속에서 전자가 튀여나온다는것이 알려진 때로부터 원자속에 전자가 있다는것이 명백해졌다. 그런데 원자는 전기적으로 중성이므로 원자안에는 전자의 음전기를 지워버리는 양전기를 가진 물질이 있어야 할것이다.

❓ 양전기를 띤 물질이 실제로 원자안에 있는가 또 있다면 어떻게 들어있는가, 전자를 가지고있는 원자의 구조는 어떻게 되여있는가.

라자포드는 물질을 이루고있는 원자의 구조를 밝히기 위하여 매우 얇은 금(Au)박판에 의한 α 립자(헬리움핵)의 산란실험을 진행하였다.

라디움에서 방출되는 +전기를 띤 질량이 큰 립자인 α 립자를 얇은 금박판에 입사시키였다.(그림 5-4)

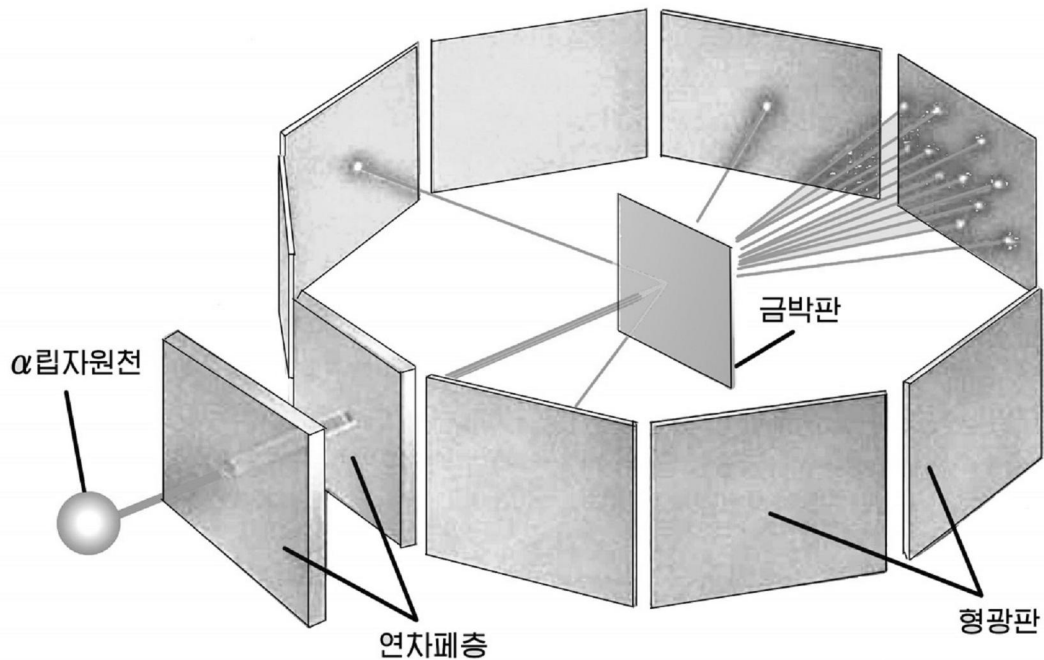



그림 5-4. α 립자의 산란실험장치

이때 대다수의 α 립자들은 운동방향을 바꾸지 않고 금박판을 그냥 통과하였지만 일부 적은 수의 α 립자들은 큰 각도로 자기의 운동방향에서 밖으로 편기되여나갔으며 지어는 반대방향으로 산란

되여나왔다.(그림 5-5)

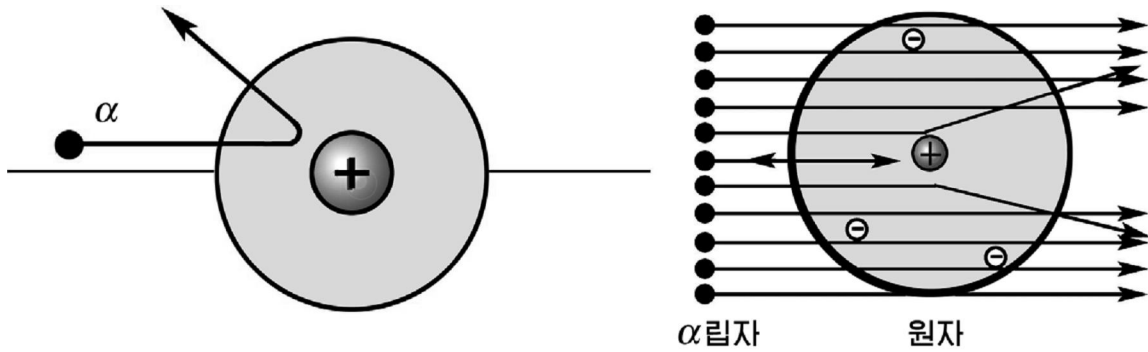



그림 5-5. α립자의 산란

라자포드의 α립자산란실험은 무엇을 보여주는가.

질량이 큰 립자인 α립자는 자기보다 질량이 훨씬 작은 립자인 전자와 충돌하여서는 자기의 운동방향을 거의 바꾸지 않는다. α립자가 산란되여 자기의 운동방향을 크게 바꾸자면 우선 질량이 큰 립자부분과 충돌하여야 하며 자기와 충돌하는 부분이 +전기량을 띠여야 한다.

대다수의 α립자들은 금박판을 그냥 통과하고 일부 적은 수의 α립자들만 크게 산란되였다는 실험적사실은 금박판에는 +전기를 띤 질량이 큰 부분이 매우 작은 공간에 집중되여있고 그사이 공간에는 질량이 작은 전자들이 놓여있다는것을 보여주고있다.

이와 같이 라자포드의 α립자산란실험은 원자는 그 중심에 +전기를 띠며 원자의 거의 모든 질량이 집중되여있는 매우 작은 립자(이 립자가 원자핵이다.)가 있고 그 주위에는 전자들이 배치되여있는 구조를 가지고있다는것을 보여준다.

실험에 의하면 원자의 중심에 놓여있는 핵의 크기는 10^{-15}∼10^{-14}m 정도이며 핵의 전기량은 원자의 원자번호가 Z인 경우에 $q=Ze$이다. 여기서 e는 전자의 전기량으로서 전기소량이다.

원자의 태양계모형

라자포드의 α립자산란실험에 의하여 원자의 중심에는 +전기를 띠고 원자의 거의 모든 질량이 집중되여있는 핵이 놓여있다는것을 알수 있게 되였다.

한편 핵주위에 있는 전자들은 정지상태에 있을수 없다. 그것은

전자들이 정지상태에 있다면 +전기를 띤 핵과 전자사이의 전기적 끌힘에 의하여 전자는 핵부분에 끌려가 핵에 붙어야 하기때문이다. 그러므로 전자는 핵주위에서 부단히 돌아가야 한다.

고전물리학적으로 볼 때 두 질점들사이에 그사이의 거리의 두제곱에 거꿀비례하는 끌힘이 향심력으로 작용하는 경우에는 질점들이 타원 또는 원자리길을 따르는 운동을 할수 있다. 이러한 전형적인 실례가 태양계에서의 천체들의 운동이다.

원자에서도 태양계에서 천체들이 태양을 중심으로 타원자리길을 따라 운동하는것과 류사하게 전기적끌힘을 향심력으로 하여 전자들이 핵주위로 타원 또는 원자리길을 따라서 운동한다고 생각할수 있다. 이렇게 생각하는 모형을 **원자의 태양계모형**이라고 부른다.(그림 5-6)

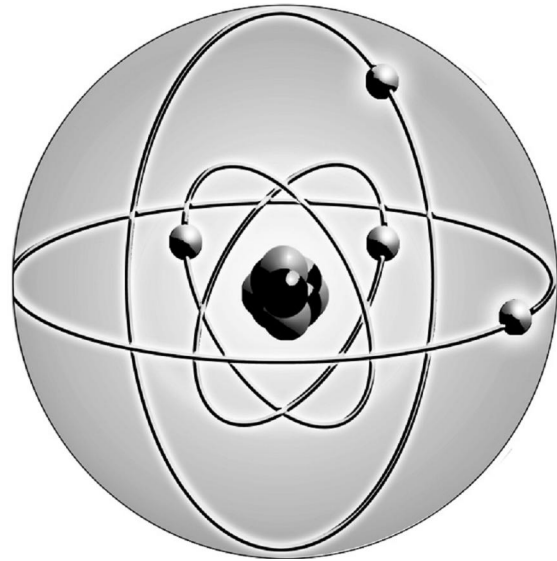



그림 5-6. 원자의 태양계모형

문제

1. 라자포드의 실험에서 핵에 원자질량의 거의 모두가 집중되여있다는것을 어떻게 알았는가?
2. 라자포드실험을 통하여 핵의 전기량이 +부호를 띤다는것을 어떻게 알았는가?
3. 왜 원자핵주위에서 전자들이 원자리길을 따라 운동할수 있다고 생각하였는가?

제4절. 수소원자의 스펙트르

수소원자의 스펙트르에 대한 경험식

원자구조는 직접 눈으로 볼수 없다. 원자구조를 더 구체적으로 밝히려면 원자에 의하여 일어나는 여러가지 현상들을 따져보아야 한다. 많은 학자들이 여러가지 물질들이 내는 빛스펙트르를 조사하는 과정에 원자마다 그에 고유한 스펙트르가 있다는것을 알아냈다.

수소원자가 내는 빛이 파장의 차례로 갈라져 배렬된것을 **수소원자의 스펙트르** 간단히 **수소스펙트르**라고 부른다. (그림 5-7)

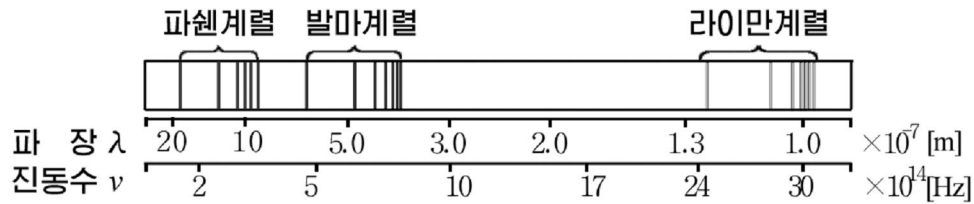



그림 5-7. 수소스펙트르

실험적으로 얻어진 수소원자의 스펙트르는 띠염띠염 떨어진 선스펙트르를 이루었다. 수소스펙트르에서 몇개의 선들은 일련의 계렬을 이루는데 이 계렬안에서 파장이 커질수록 선들의 간격이 넓어진다. 발마는 수소원자에서 복사되는 보임빛스펙트르를 계산하기 위한 경험식을 내놓았다.

$$\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{2^2}-\frac{1}{k^2}\right) \qquad (1)$$

$$(k=3,\ 4,\ 5,\ \cdots)$$

여기서 λ는 보임빛의 파장이고 R는

$$R=1.097\times10^7\ \mathrm{m}^{-1}$$

로서 **리드베르그상수**(스펙트르상수)라고 부른다.

발마의 공식 1에 의하여 결정된 수소원자의 보임빛스펙트르는 실험관측자료와 잘 일치하였다.

수소원자의 스펙트르에 대한 실험적관측은 수소원자가 보임빛대역의 빛밖에도 자외선대역과 적외선대역의 빛을 복사한다는것을 보여준다. 수소원자가 복사하는 빛의 스펙트르는 다음의 하나의 공

식으로 적을수 있다.

$$\frac{1}{\lambda}=R\left(\frac{1}{m^2}-\frac{1}{n^2}\right) \quad \text{수소원자의 스펙트르} \tag{2}$$
$$m=1,\ 2,\ 3,\ \cdots$$
$$n=m+1,\ m+2,\ \cdots$$

식 2에서 $m=1$은 자외선(**라이만계렬**스펙트르), $m=2$는 보임빛(**발마계렬**스펙트르), $m=3$은 적외선(**파쉔계렬**스펙트르)에 해당한다.

수소원자의 스펙트르는 수소원자에서 나온 빛량자들의 에네르기스펙트르이다. 그러므로 수소원자의 스펙트르는 수소원자의 불련속적인 에네르기상태를 반영한다고 볼수 있다.

수소원자에 대한 고전적취급

수소원자의 에네르기상태를 고전물리학적으로 살펴보자.

수소원자에서는 핵주위에 하나의 전자가 운동하고있다.

원자의 태양계모형에 따라 핵주위로 전자가 원자리길을 따라 운동한다고 하자. 이때 수소원자에서 전자와 핵사이의 전기적호상작용에네르기는

$$U=-k\frac{e^2}{r}$$

이다. 여기서 e, r는 각각 전자의 전기량, 핵으로부터 전자까지의 거리이며 $k=9\times10^9\ \mathrm{N\cdot m^2/C^2}$이다.

뉴톤력학에 따라서 전자의 전에네르기는

$$E=\frac{mv^2}{2}-k\frac{e^2}{r} \tag{3}$$

이다. 여기서 m은 전자의 정지질량, v는 원자에서 전자의 운동속도이다.

전자가 반경이 r인 원자리길을 따라서 속도 v로 운동한다고 할 때 핵이 전자에 미치는 전기적끌힘이 향심력의 역할을 하므로 뉴톤력학에 따라서

$$\frac{mv^2}{r} = k\frac{e^2}{r^2} \qquad (4)$$

이 성립한다.(그림 5-8)

그러므로 식 3과 4로부터

$$E = -\frac{k\,e^2}{2\,r} \qquad (5)$$

으로 된다.

그림 5-8. 수소원자에서 핵과 전자의 전기적호상작용

원자의 태양계모형에 따라 고전물리학적표상에 기초하여 얻은 식 5에서는 고전력학에서 원자리길반경 r가 임의의 값을 가질수 있기때문에 에네르기 E도 임의의 값을 가질수 있다.

이것은 수소원자의 스펙트르가 띠염띠염 떨어진 선스펙트르를 이룬다는 실험적사실을 설명하지 못한다.

수소원자의 스펙트르에 대한 경험식은 관측자료와 잘 일치하는 결과들을 주었지만 이 경험식을 고전물리학적으로는 설명하지 못한다.

문제

1. 수소원자스펙트르의 발마계렬에서 제일 긴 파장과 제일 짧은 파장을 구하여라.
2. 다음 문장들의 □안에 알맞는 글을 써넣어라.
   ㄱ) 수소원자의 스펙트르는 □로 된다.
   ㄴ) 고전물리학적으로는 □의 스펙트르의 □을 설명할수 없다.
   ㄷ) 원자의 태양계모형은 원자가 불련속적인 에네르기상태로 존재한다는 사실을 설명□

제5절. 보아의 량자가정

보아의 량자가정

보아는 원자의 불련속적인 에네르기상태와 관련된 실험적사실을 옳게 설명하기 위하여 두가지 가정을 내놓았다.

첫째 가정은 정상상태에 대한 가정이다.

원자에서 전자들은 일정한 에네르기 E_n 을 가지는 **정상상태**라고 부르는 특수한 상태들에만 놓여있다.

원자에서의 전자의 에네르기상태는 정상상태에 놓여있는 전자의 에네르기들을 에네르기값에 해당한 수평선들로 표시한다. (그림 5-9)

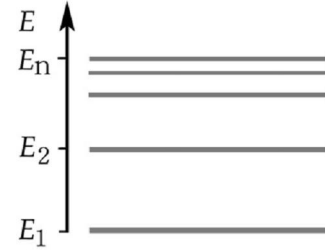



그림 5-9. 원자에서 에네르기준위

이 매개 수평선들을 **에네르기준위**라고 부른다.

에네르기가 제일 낮은 값에 해당한 에네르기준위 E_1를 원자의 **바닥준위**라고 부르며 바닥준위보다 에네르기가 더 큰 그밖의 다른 준위 E_2, E_3, …들을 원자의 **려기준위**들이라고 부른다.

정상상태에서 원자는 빛을 복사하지 않는다.

둘째 가정은 빛의 진동수에 대한 가정이다.

원자에서 빛은 전자가 어떤 에네르기 E_n 을 가지는 한 정상상태에서 보다 낮은 에네르기 E_m 을 가지는 다른 정상상태에로 이행할 때 나온다. 이때 나오는 빛량자의 에네르기는 다음과 같다.

$$h\nu = E_n - E_m \quad \text{빛량자복사에네르기}$$

원자에서 전자상태와 관련하여 보아가 제기한 두가지 제한조건을 **보아의 량자가정**이라고 부른다.

수소원자에 대한 보아의 초기량자리론

보아는 고전물리학적표상과 량자가정에 기초하여 수소원자에 대한 량자리론을 세웠다. 이 리론을 보아의 **초기량자리론**이라고 부른다.

수소원자에서는 전자가 정상상태에 해당하는 띠염띠염 떨어진 일정한 값들만을 가질수 있다는 사실을 반영하기 위하여 보아는 수소원자문제를 고전적으로 취급하면서 여기에 다음과 같은 가정을 보충적으로 제기하였다.

$mvr = n\hbar$ 보아의 량자화규칙
(n=1, 2, 3, …)

보아의 량자화규칙과 식

$$\frac{mv^2}{r} = k\frac{e^2}{r^2}$$

으로부터 수소원자에서 전자의 원자리길반경은

$$r_n = \frac{\hbar^2}{kme^2}n^2$$

과 같이 량자화된다는것을 알수 있다. 여기서 $n=1$일 때

$$r_\mathrm{B} = \frac{\hbar^2}{kme^2} \approx 0.5\times10^{-10}\ \mathrm{m}$$

을 얻는데 이것은 수소원자의 바닥상태에서 전자의 자리길반경이다. 이것을 **보아의 반경**이라고 부른다. 전자의 자리길반경식을 에네르기식

$$E = -\frac{ke^2}{2r}$$

에 넣으면 수소원자에서 전자의 에네르기준위는

$E_n = -\frac{mk^2e^4}{2\hbar^2}\cdot\frac{1}{n^2}$ 수소원자에서 전자의 에네르기준위
(n=1, 2, 3, …)

과 같이 주어진다. 이때 $E_1 = -13.6\,\mathrm{eV}$이다.

웃식에서 볼수 있는것처럼 수소원자에서 전자는 불련속적인 에네르기를 가진다. 다시말하여 수소원자에서 전자의 에네르기는 량자화된다.

수소원자에서 전자의 에네르기식을 리용하면 보아의 량자가정에 의하여 수소원자에서 복사되는 빛의 진동수는

$$\nu = \frac{E_n - E_m}{h} = \frac{mk^2e^4}{4\pi \hbar^3}\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

로 된다. 이 식으로부터 다음의 식을 얻을수 있다.

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c} = \frac{mk^2e^4}{4\pi \hbar^3 c}\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right) = R\left(\frac{1}{m^2} - \frac{1}{n^2}\right)$$

로 된다. 여기서 리드베르그상수는 $R = \frac{mk^2e^4}{4\pi \hbar^3 c}$ 이다.

이 식은 수소원자의 스펙트르에 대한 경험식과 일치한다. 이것은 수소원자의 스펙트르는 수소원자에 대한 보아의 초기량자리론에 의하여 원만히 설명된다는것을 의미한다.

문제

1. 수소원자에서 전자의 자리길은 어떻게 배치되는가?
2. 수소원자에서 빛은 어떻게 복사되는가?
3. 수소원자에서 $n=2$, 3 준위에 있던 전자가 $n=1$ 인 준위로 이행할 때 복사되는 빛의 진동수를 계산하여라.

제6절. 물질의 2중성

물질파

? 파동성만을 가진다고 생각했던 빛이 립자성도 가진다면 립자성만을 가진다고 생각하는 립자도 파동성을 가질수 있지 않겠는가.

이와 관련하여 프랑스의 물리학자 드 브로이는 립자는 립자성을 가질뿐아니라 파동성도 가진다는 가정을 제기하였다.

드 브로이는 운동량 P, 에네르기 E 를 가지고 공간적으로 작은 자리를 차지하고있는 립자의 운동에는 다음과 같이 결정되는 파장과 진동수를 가지는 파동에 대응하는 파동성을 부여할수 있다고 가정하였다.

$$\lambda = \frac{h}{P} = \frac{2\pi\hbar}{P}$$ 드 브로이파의 파장 (1)

$$\nu = \frac{E}{h} \quad \left(\omega = \frac{E}{\hbar}\right)$$ 드 브로이파의 진동수(각진동수) (2)

물질립자의 운동에 대응하는 이러한 파동을 **드 브로이파** 또는 **물질파**라고 부른다.

드 브로이의 가정에 따르면 <u>물질립자는 드 브로이파(물질파)의 파장과 진동수를 가지는 파동에 해당한 파동성을 나타내야 한다.</u>

전자선의 에돌이실험

만일 전자파동의 파장이 렌트겐선의 파장정도로 된다면 그것이 결정속에서 렌트겐선과 비슷한 에돌이무늬를 만들수 있을것이다.

그림 5-10에 전자선의 에돌이무늬를 관측하기 위한 실험을 보여준다.

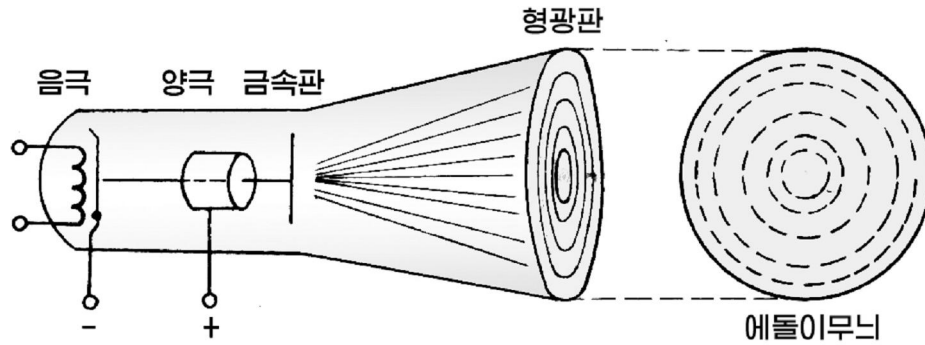



그림 5-10. 전자선의 에돌이무늬를 보여주는 실험

가열된 음극에서 튀여나온 열전자는 음극과 양극사이에 생긴 전기마당의 작용으로 가속되여 전자선이 된다. 전자선은 얇은 금속판을 지나면서 에돌이하여 형광판에 에돌이무늬를 만든다.

음극과 양극사이에 걸린 전압을 U라고 하면 음극으로부터 튀여나와서 양극을 지날 때 전자의 운동에네르기는 eU와 같으므로

$$\frac{mv^2}{2}=eU \quad \rightarrow \quad mv=\sqrt{2emU}$$

$$\lambda=\frac{h}{mv}=\frac{h}{\sqrt{2emU}}\approx\frac{1.2}{\sqrt{U}}\ [\mathrm{nm}] \qquad (3)$$

만일 전압이 $U=100\mathrm{V}$이면 $\lambda\approx 0.1\mathrm{nm}$정도인 전자파동이 금속판을 지나가게 된다. 실례로 금속판을 얇은 금판으로 하면 전자선관의 형광판에 그림 5-11의 ㄱ와 같은 에돌이무늬가 나타난다.

이것은 렌트겐선이 알루미니움판을 통과할 때 만드는 에돌이무늬(그림 5-11의 ㄴ)와 비슷하다.

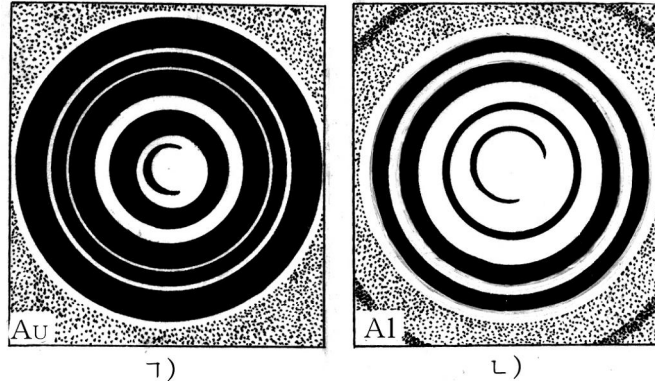



그림 5-11. 전자선의 에돌이무늬와 렌트겐선에돌이무늬의 비교

이 실험을 통하여 전자가 파동성을 가진다는것이 증명된다. 원자안에서는 전자의 파동성이 뚜렷하게 나타난다.

물질의 2중성

전자선에 의하여 얻어진 에돌이무늬도 개별적인 전자들의 흔적으로 이루어진다. 즉 흔적들의 전체 모임은 파동이 입사한 경우와 같은 배치를 가진다. 이러한 사실은 전자는 립자성과 파동성을 다 같이 띠고있다는것 즉 2중성을 띠고있다는것을 말해준다.

물질립자의 2중성은 전자뿐만아니라 다른 물질립자들에 대해서도 실험적으로 관측되였다.

이것은 물질립자는 일반적으로 립자성과 함께 파동성도 같이 띤다는것을 말해준다. 물질의 이러한 성질을 **물질의 2중성**이라고 부른다.(그림 5-12)

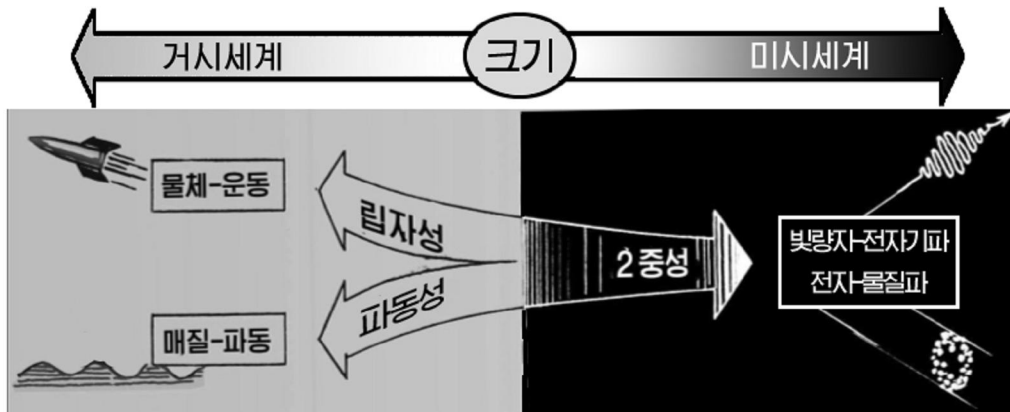



그림 5-12. 물질의 2중성

립자의 파동성은 원자세계와 같은 미시세계에서 본질적이며 주되는 현상으로 나타난다.

문제

1. 질량이 1g이고 속도가 0.5m/s인 물체의 드 브로이파장을 구하여라. 그리고 이로부터 얻어지는 결론을 말하여라.
2. 다음의 문장들에서 옳은 점과 틀린 점을 찾아내여라.
   ㄱ) 전자는 파동성을 가지므로 하나의 전자가 단결정에 입사하는 경우에 에돌이무늬가 나타난다.
   ㄴ) 니켈단결정에 전자선이 입사하는 경우에 얻어진 에돌이무늬는 파동이 입사한 경우와 같다. 이것은 전자가 파동성을 띠고있다는것을 보여준다.

복습문제(1)

1. 절연물로 만들어진 대우에 금속판이 놓여있다. 이 판의 겉면에 빛을 쪼여주면 금속판이 전기를 띠였다고 볼수 있다. 그 전기의 부호는 +이겠는가 −이겠는가? 그 리유를 말하여라.
2. 빛전자의 처음운동에네르기가 0.5eV이다. 이 빛전자가 빛전자관의 양극에 이르지 못하게 하려면 빛전자관의 양극과 음극사이에 얼마만한 거꿀전압을 걸어야 하겠는가?

   (답. 0.5V이상)
3. 립자로서의 전자와 빛량자의 차이를 설명하여라.
4. 빛전기현상에서 튀여나온 빛전자의 최대운동에네르기는 4.5×10^{-20}J이고 금속의 방출일은 7.6×10^{-19}J이다. 금속에 쪼인 빛의 파장을 구하여라.

   (답. 약 2.47×10^{-7}m)
5. 세시움에 파장이 75nm인 자외선을 쪼일 때 그로부터 튀여나온 전자의 속도를 구하여라. 세시움의 방출일은 1.89eV이다.

   (답. 약 2.27×10^{6}m/s)
6. 라자포드의 산란실험에서 왜 금박판의 두께를 얇게 하는가?
7. α립자가 금원자의 중심으로부터 4×10^{-14}m 떨어진 거리까지 접근하기 위해서는 α립자에 얼마만한 운동에네르기를 주어야 하는가 ?

   (답. 5.7MeV)
8. 수소원자에서 전자가 핵에 끌려가 붙지 않기 위해서는 0.5×10^{-10}m

정도의 반경에서 얼마나 빠른 속도로 돌아야 하겠는가?

(**답.** 약 2.25×10^{6}m/s)

9. 한개의 수소원자가 한꺼번에 여러가지 파장의 빛을 내보내는가 아니면 한개 파장의 빛을 내보내는가? 수소스펙트르는 어떻게 되여 얻어지는가?

10. 고전물리학적으로는 수소원자에서 나타나는 어떤 사실을 설명하지 못하는가?

11. 수소기체를 가열하여 빛을 내게 하였다. 이때 수소원자들이 n=5인 상태까지 려기되였다가 낮은 에네르기상태로 이행하면서 빛을 낸다면 스펙트르에 나타날수 있는 선의 수는 얼마이겠는가?

(**답.** 10개)

12. $n=2$인 경우에 수소원자의 운동에네르기, 포텐샬에네르기, 전에네르기를 구하여라.

(**답.** 3.4eV, −6.8eV, −3.4eV)

13. 수소원자에서 전자가 $n=2$인 에네르기준위로부터 $n=1$인 에네르기준위에로 이행할 때 복사되는 빛의 파장을 구하여라.

(**답.** 약 122nm)

14. 수소원자의 두번째 자리길의 반경과 전자의 속도를 구하여라.

(**답.** 약 2.12×10^{-10}m, 약 1.09×10^{6}m/s)

15. 전자가 파동성을 띤다는것은 어디에서 찾아볼수 있는가?

16. 전압이 200V인 전기마당속에서 가속된 대전립자의 파장이 2.02×10^{-12}m이다. 이 립자의 전기량은 크기에 있어서 전자의 전기량과 같다. 립자의 질량을 구하여라.

(**답.** 1.68×10^{-27}kg)

17. 빛량자와 전자의 운동에네르기가 다같이 1eV이다. 이 립자들에 대응하는 파장들을 구하여라.

(**답.** 약 1.24μm, 약 1.23nm)

복습문제(2)

1. 빛전자관에서 음극과 양극사이에 전압이 걸려있지 않은 경우에도 음극에 빛을 쪼이면 전류가 흐른다. 이것은 무엇을 보여주는가?
2. 빛전자의 처음속도가 5.6×10^{5}m/s라면 이 빛전자에 의한 빛전류를 령으로 되게 하는 거꿀전압은 몇V인가?

   (답. 약 0.89V)
3. 빛을 빛량자들의 흐름으로 보는것은 무엇때문인가?
4. 전력이 40W인 전등에서 나오는 빛의 평균파장이 6×10^{-7}m라면 1s동안에 전등에서 나오는 빛량자는 몇개이겠는가?

   (답. 약 1.2×10^{20}개)
5. 어떤 금속의 겉면에 파장이 λ_1=350nm와 λ_2=540nm인 빛을 번갈아 쪼일 때 튀여나오는 빛전자의 최대속도는 2배만큼 되였다. 이 금속의 방출일을 구하여라.

   (답. 약 1.88eV)
6. 에네르기가 7.84×10^{-19}J인 빛량자가 방출일이 7.2×10^{-19}J인 금속에 흡수되여 빛전기현상을 일으킨다. 매개 전자가 금속에서 튀여나올 때 금속에 넘겨주는 최대운동량을 구하여라.

   (답. 3.41×10^{-25}kg·m/s)
7. 빛이 립자성과 파동성을 띤다는것은 어디에서 찾아볼수 있는가?
8. α립자의 산란실험에서 원자핵의 중심을 향해 날아드는 α립자는 핵에 얼마만한 거리까지 접근할수 있는가? α립자의 속도는 1.9×10^{7}m/s, 질량은 6.6×10^{-27}kg, 전기량은 3.2×10^{-19}C이고 금원자핵의 전기량은 1.3×10^{-17}C이다.

   (답. 3.14×10^{-14}m)
9. 전자기파의 복사리론에 의하면 라자포드가 내놓은 원자의 태양계모형이란 있을수 없다. 왜 그런가?
10. 발마계렬에서 수소스펙트르의 최대파장은 656.3nm이다. 이 파장을 써서 라이만계렬의 최대파장을 구하여라.

    (답. 121.5nm)
11. 수소원자의 스펙트르의 발마계렬에서 진동수가 가장 작은것이 4.6×10^{14}Hz이다. 스펙트르공식에서 리드베르그상수의 값을 계산하여라. (답. $1.1\times10^{7}\mathrm{m}^{-1}$)

12. 수소원자에서 전자가 n번째 자리길로부터 m=2인 자리길로 옮겨가면서 486nm의 파장을 가진 빛량자를 내보낸다. n번째 자리길의 반경을 구하여라.

(**답.** 8.48×10^{-10}m)

13. 수소원자의 에네르기준위는 $E_n=-\frac{13.6}{n^2}$eV 로 계산된다. 바닥준위에 있던 수소원자가 빛을 흡수하여 보다 높은 준위로 이동하였다. 그때 흡수하는 빛량자의 에네르기와 파장을 구하여라. 만일 바닥상태에 있던 전자를 원자핵으로부터 완전히 분리시키자면 그 파장은 얼마보다 작아야 하는가?

(**답.** 10.2eV, 121.8nm, 91.35nm이하)

14. 수소원자에서 전자가 량자수 n인 상태로 넘어갈 때 자리길반경은 9배 변하였다. 이 수소원자에서 나오는 빛의 진동수를 구하여라.

(**답.** $\frac{8Rc}{9n^2}$)

15. 전자의 물질파의 파장이 10^{-10}m로부터 5×10^{-11}m로 작아지기 위해서는 전자에 얼마만한 에네르기를 주어야 하는가?

(**답.** 약 452eV)

16. 수소원자에서 전자가 두번째 자리길을 따라 운동하고있다면 이 전자의 물질파의 파장은 얼마인가?

(**답.** 6.6×10^{-10}m)

17. TV수상관에서 전자총으로부터 나온 전자들은 가속되여 형광막에 떨어지면서 그림을 그린다. 이때 전자들의 운동에서 2중성을 론의하는가, 왜 그런가?

제6장. 특수상대성리론의 초보

진공속에서의 빛의 전파속도에 비해 매우 작은 속도를 가지고 일어나는 물체의 운동을 대상으로 하고있는 뉴톤력학은 빛속도나 그에 가까운 속도를 가지고 일어나는 물리적현상들에 대해서는 옳바른 설명을 주지 못한다.

특수상대성리론은 뉴톤력학에만 국한되여있던 상대성원리의 내용을 빛의 전파현상을 포함한 전자기현상에까지 일반화하는 과정에 나오게 되였다. 뉴톤력학에서와는 달리 특수상대성리론에서는 시간간격과 공간길이가 어떤 관성계에서 론의하는가에 따라 달라진다.

이 장에서는 특수상대성리론의 기본가정에 기초하여 시간과 공간의 상대성, 질량과 에네르기사이의 관계를 표시하는 아인슈타인의 공식에 대하여 초보적으로 배우게 된다.

제1절. 특수상대성리론의 기본가정

갈릴레이의 상대성원리

갈릴레이의 상대성원리는 서로 다른 관성계에서 고전력학적운동을 살펴볼 때 운동이 어떻게 관측되는가에 대하여 보여준다.

역구내에 멎어있던 두 렬차가운데서 떠나는 렬차에 타고있는 사람(자기 렬차의 출발을 느끼지 못할 때)이 나란히 서있는 다른 렬차가 떠나는것(반대방향으로 출발한다고)으로 느끼는것은 자기를 기준계로 정하고 그 렬차를 보기때문이다.(그림 6-1)

그림 6-1. 두 관성계에서 력학적운동은 꼭같이 일어난다

만일 멎어있는 전동차와 그에 대하여 등속직선운동하는 전동차안에서 꼭같은 처음속도와 각도로 철구를 던지는 실험을 한다면 처음조건이 같을 때에는 철구의 운동이 꼭같이 관측된다.

멎어있는 전동차나 등속직선운동하는 전동차는 관성계로 생각할수 있다. 그러므로 서로 등속직선운동하는 두개의 관성계가 있을때 같은 조건에서 매우 작은 운동속도로 일어나는 력학적운동을 보

고서는 두개의 관성계를 서로 구별할수 없다고 생각할수 있다.

이로부터 꼭같은 조건에서 모든 관성계에서는 력학적운동이 꼭같게 일어난다고 생각하고 이 가정을 **갈릴레이의 상대성원리**라고 부른다.

같은 처음조건에서 모든 관성계에서 력학적운동이 꼭같게 일어나려면 모든 관성계에서 력학적운동에 대한 운동법칙이 꼭같아야 한다. 그것은 운동법칙이 같아야 같은 처음조건을 넣을 때 같은 결과가 나올수 있기때문이다. 그러므로 갈릴레이의 상대성원리를 모든 관성계에서 력학적운동법칙은 꼭같다라고 표현할수 있다.

갈릴레이의 상대성원리는 고전력학적운동을 관찰할 때 모든 관성계들은 물리적으로 같은 자격을 가지고있으며 서로 구별할수 없다는것을 보여준다. 이 사실을 모든 관성계들은 물리적으로 등가이다라고 표현한다.

아인슈타인의 특수상대성원리

고전력학적운동에 대하여 성립하는 상대성원리가 전자기적현상에 대해서도 일반화할수 있는가 하는 문제가 제기된다.

실험적사실들은 력학적운동에 대해서뿐아니라 전자기적현상에 대해서도 같은 조건에서 일어나는 물리적현상은 두 관성계에서 꼭같다는것을 보여준다.

이로부터 력학적운동뿐아니라 전자기적현상도 포함하여 같은 조건에서 모든 관성계에서는 물리적현상이 꼭같게 일어난다고 생각하고 이 가정을 **상대성원리**라고 부른다.

상대성원리는 모든 관성계에서 물리적현상들에 성립하는 물리법칙은 다같다라고 표현할수 있다. 이것은 같은 조건에서 일어나는 물리적현상을 보아서는 어느 관성계에서 관찰하는지 알수 없으므로 모든 관성계들은 물리적으로 등가이다는것을 의미한다.

빛의 전파속도에 대한 많은 측정실험은 진공속에서의 빛의 전파속도가 $c=3\times10^8\mathrm{m/s}$ 로서 관성계에 관계없이 일정하다고 주장할수 있는 실험적근거를 주었다. 실례로 마이켈손의 빛속도측정실험을 들수 있다.

이와 함께 실험적사실들은 빛속도는 자연계에서 존재하는 한계속도 즉 최대속도라고 생각할수 있다는것을 보여주었다. 이로부터

빛속도를 자연계에서 존재하는 **한계속도** 즉 **최대속도**라고 할수 있다.(그림 6-2)

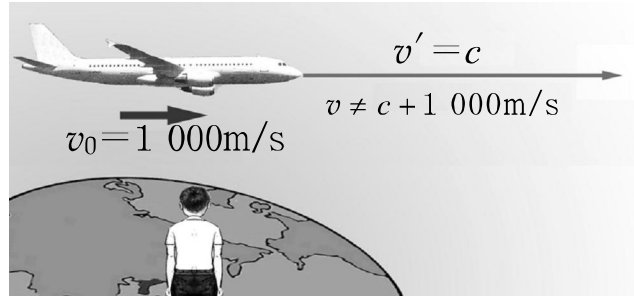



그림 6-2. 빛속도는 한계속도

그런데 전자기파인 빛에서 나타나는 이러한 사실은 뉴톤력학적표상에 기초해서는 설명할수 없었다. 그러므로 뉴톤력학으로써는 설명되지 않는 이 새로운 실험적사실을 반영하여 새로운 원리적인 한가지 가정 즉 빛속도불변성이라는 가정을 더 하게 되였다.

여러가지 실험적사실들로부터 자연계에 존재하는 최대속도로서 진공속에서의 빛의 전파속도가 관성계에 관계없이 일정하다고 가정한다. 이 가정을 **빛속도불변성** 또는 **빛속도불변의 원리**라고 부른다.

상대성원리와 빛속도불변의 원리를 통털어서 **아인슈타인의 특수상대성원리** 또는 **특수상대성리론의 기본가정**이라고 부른다.

다시말하여 아인슈타인의 특수상대성원리는 상대성원리와 빛속도불변의 원리라는 두가지 내용으로 이루어져있다.

문제

1. 뉴톤력학이 정확히 설명하는 운동들과 설명하지 못하는 운동들은 어떤것들인가?
2. 특수상대성리론은 고전력학의 어떤 제한성때문에 세워지게 되였는가?
3. 다음의 문제들에서 옳은 점과 틀린 점을 찾아내여라.
   ㄱ) 상대성원리에 의하여 모든 관성계들에서 물체의 운동모양은 꼭같다.
   ㄴ) 모든 물질에서 빛의 전파속도는 다같다.
   ㄷ) 특수상대성리론은 뉴톤력학의 내용을 자체내에 포함하여야 한다.

마이켈손의 빛속도측정실험

여러가지 관성계에서 빛속도를 정확히 재기 위한 많은 실험들이 진행되였는데 그중 유명한 실험이 마이켈손이 진행한 실험이다. 마이켈손은 한곳에

서 나오는 빛을 두개로 갈라 하나는 지구의 운동방향과 수직으로 보내고 다른 하나는 지구의 운동방향으로 보냈다가 두 빛이 간섭하게 하였다. 마이켈손의 실험장치는 두 방향으로 보낸 빛의 전파속도에서 미소한 차이라도 나타난다면 두 빛을 리용하여 간섭무늬의 변화를 관측하게 되여있다. 실험에서는 간섭무늬의 변화가 관측되지 않았다. 처음에는 지구의 운동속도가 아주 크기때문에 갈릴레이속도합성규칙에 따라서 두 방향에서의 빛속도의 차이가 비교적 클것이라고 생각하였다. 그런데 실험은 빛원천이나 관측자가 어떻게 운동하는가에 관계없이 빛의 전파속도가 언제나 같다는 결과를 주었다.

제2절. 시간과 공간의 상대성

동시각의 상대성

뉴톤력학에서는 어떤 두 물리적현상이 동시에 일어난다고 하면 그 두 현상은 어떤 관성계에서 관찰하든지 언제나 동시에 일어나는것으로 본다. 그러나 특수상대성원리가 성립하는 특수상대성리론에서는 물리적현상들이 동시에 일어난다는 사실이 뉴톤력학에서 생각하던것과는 완전히 다르게 해석된다.

? 그러면 특수상대성리론에서는 동시각이라는것이 어떻게 해석되는가.

기차가 수평인 직선궤도를 따라 일정한 속도로 빨리 달린다고 하자. 이때 려객차량(한 관성계)의 중심에 놓여있는 빛원천에서 빛이 한번 번쩍하고 방출되여 차량의 앞벽과 뒤벽쪽으로 비쳐준다고 하자.

이때 빛이 려객차량의 앞벽과 뒤벽에 도달하는 시각들이 기차에 타고있는 관측자와 기차밖의 땅면에 서있는 관측자에게는 어떻게 보이겠는가. (그림 6-3)

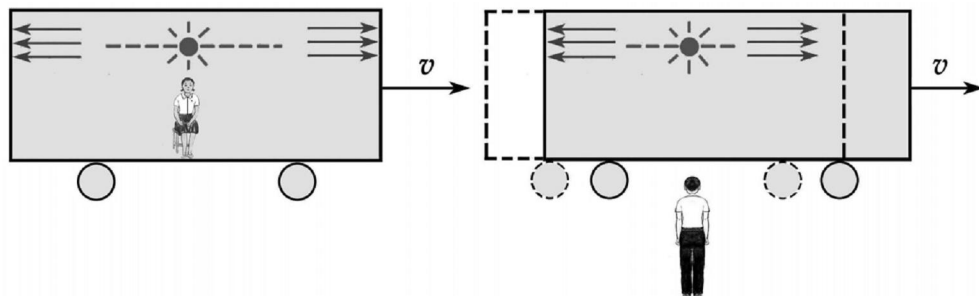



그림 6-3. 동시각의 상대성

기차에 탄 관측자는 앞벽과 뒤벽이 중심으로부터 같은 거리만큼 떨어져있고 빛의 전파속도가 앞쪽과 뒤쪽방향에서 다같기때문에 빛이 앞벽과 뒤벽에 동시에 가닿는다고 생각한다. 그러나 기차밖의 땅면(다른 관성계)에 서있는 관측자는 빛의 전파속도는 일정하고 기차가 앞으로 이동하기때문에 빛이 뒤벽에 먼저 이르고 앞벽에 후에 도달한다고 생각한다.

기차안에 타고있는 관측자에게는 동시에 일어나는것으로 관측되는 물리적현상이 기차밖에 있는 관측자에게는 동시에 일어나는것으로 관측되지 않는다. 이것은 어떤 관성계에서 동시에 일어났다고 생각하는 두 현상이 다른 관성계에서는 동시에 일어난것으로 되지 않는다는것을 말한다.

이와 같이 어떤 관성계에서는 동시에 일어나는 현상이 다른 관성계에서는 동시에 일어나지 않는것으로 되는 사실을 **동시각의 상대성**이라고 부른다.

동시라는 개념은 관성계에 따라 달라지는 상대적인것으로 된다. 그러나 우리의 일상생활에서는 물체의 운동속도에 비하여 빛의 전파속도가 너무 크기때문에 빛이 앞벽과 뒤벽에 이르는 시간의 차이를 가려내기 힘들므로 이러한 동시각의 상대성을 느끼지 못한다.

시간의 지연

❓ 시간은 고정불변한가 아니면 관성계에 따라 달라지는가.

려객차량의 밑바닥에 놓여있는 광원에서 차량의 천정쪽으로 수직으로 방출된 빛이 천정에 있는 거울에서 반사되여 돌아오는 현상을 기차에 타고있는 사람과 기차밖의 땅면에 서있는 사람이 본다고 하자.(그림 6-4)

기차안에 타고있는 사람(운동하는 관성계)이 관찰할 때 빛이 천정에 있는 거울에서 반사되여 다시 제자리로 돌아오는데 걸린 시간간격 Δt_0 과 땅면에 서있는 사람(멎어있는 관성계)이 이 현상을 관찰할 때 걸린 시간간격 Δt 사이에는 다음의 관계가 성립한다.

$$\Delta t = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1-\left(\frac{v}{c}\right)^2}} \qquad \text{시간의 지연}$$

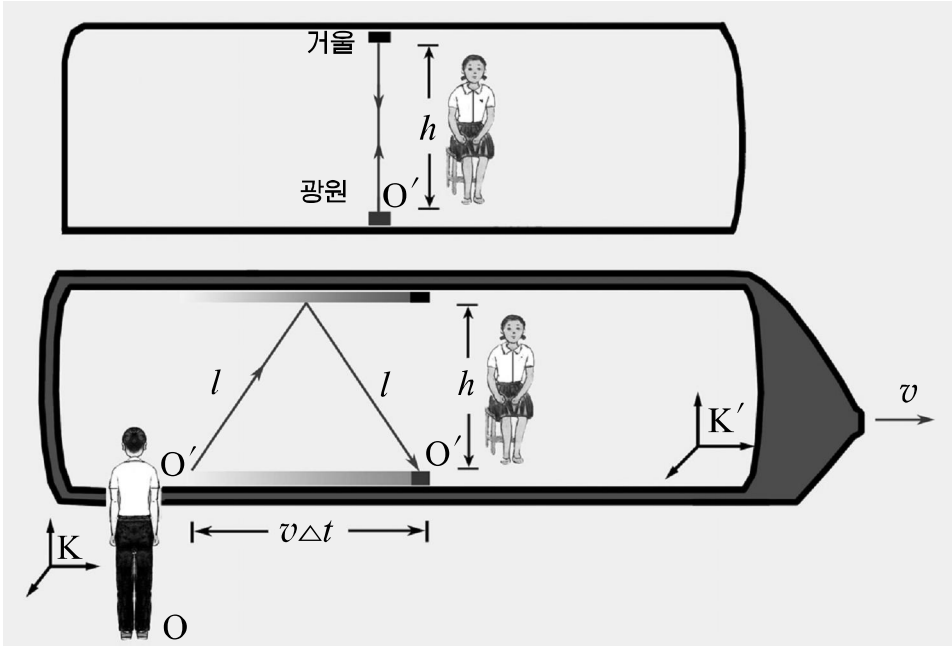



그림 6-4. 두 관성계에서 시간이 다르게 나타난다

이것은 같은 현상을 놓고도 땅면에 서있는 사람은 기차안에 타고있는 사람보다 시간간격이 좀 더 길다고 생각한다는것을 말한다. 다시말하여 멎어있는 관성계에서는 운동하는 관성계에서보다 흘러간 시간간격이 더 길어진다. 이것을 **시간의 지연**현상이라고 부른다.

시간간격의 상대성은 뮤온의 수명측정에서 실제적으로 관측되였다.

길이의 수축

물체의 길이도 관성계에 따라 달라지겠는가.

일정한 길이를 가진 막대기가 그 길이방향이 기차가 운동하는 방향과 일치하도록 려객차량안에 놓여있다고 하자. 이 막대기의 길이를 려객차량안에 타고있는 관측자와 기차밖의 땅면에 서있는 관측자가 측정한다고 하자.(그림 6-5)

두 관측자가 막대기의 길이를 측정할 때 기차에 타고있는 사람(한 관성계)이 측정한 막대기의 길이를 l_0, 기차밖의 땅면에 서있는 사람(다른 관성계)이 측정한 막대기의 길이를 l이라고 하면 다

음의 관계가 성립한다.

$$l = l_0\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}} \qquad \text{길이의 수축}$$

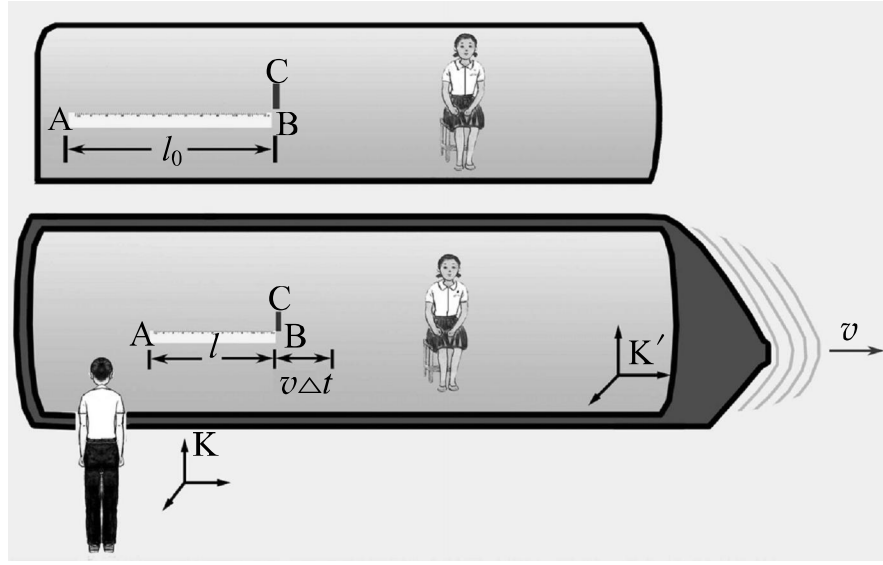



그림 6-5. 두 관성계에서 길이가 다르게 나타난다

이것은 운동하는 막대기의 길이가 운동방향으로 축소된것으로 관측된다는것을 말한다. 이것을 **길이의 수축**현상이라고 부른다.

동시각의 상대성과 시간의 지연, 길이의 수축현상들은 특수상대성리론에서는 시간과 공간이 상대성을 띤다는것을 보여준다. 즉 동시각의 개념, 물리적현상이 일어난 시간간격, 공간길이가 어떤 관성계에서 관측하는가에 따라서 서로 달라진다는것을 의미한다.

문제

1. 8km/s의 속도로 운동하는 인공지구위성에 놓인 시계가 1min 동안 간다면 땅면에 있는 시계에서는 얼마만한 시간이 흘러가는가? 이것을 통하여 무엇을 알수 있는가?
2. 다음의 문제들에서 옳은 점과 틀린 점을 찾아내여라.
   ㄱ) 달리는 기차의 려객차량안에 두 사람이 타고있다. 그중 한 사람에게 두 물리적현상이 동시에 관측되였다면 다른 사람에게는 동시에 관측되지 않을수 있다.
   ㄴ) 서로 다른 관성계에서 막대기의 길이가 다르게 보이므로 진짜 막대기의 길이에 대하여 생각할수 없다.

제3절. 질량과 에네르기사이의 관계

질 량

뉴톤력학에서 물체의 질량은 운동과는 관련이 없는 일정한 값을 가진다. 그러므로 뉴톤력학에서는 일정한 힘이 작용하는 경우에 물체가 일정한 가속도를 가지고 운동하며 시간이 지남에 따라 물체의 속도는 끝없이 커지게 된다는 결론이 나온다.

그러면 물체가 빛속도에 가까운 속도로 운동할 때에도 질량은 속도에 관계없이 일정하겠는가.

특수상대성리론에서는 물체의 질량이 운동과는 관련이 없는 일정한 값으로 되지는 않는다.

특수상대성리론에서는 질량이 운동속도에 다음과 같이 관계된다.

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \qquad \text{상대론적질량}$$

여기서 m_0은 물체가 정지하고있을 때의 질량으로서 **정지질량**이라고 부른다. 그리고 m은 속도가 $\vec{v}$인 물체의 질량으로서 **상대론적 질량(운동질량)**이라고 부른다.

웃식은 물체의 속도가 커짐에 따라 물체의 질량이 증가하며 운동속도가 빛속도에 비하여 훨씬 작게 되는 일상생활에서는 물체의 질량이 증가하는 현상이 눈에 띄게 나타나지 않지만 속도가 빛속도에 가까와질 때에는 질량증가현상이 현저하게 나타난다는것을 보여준다.

실제적으로 양성자나 전자와 같은 립자들을 가속시키는 가속장치들에서는 립자들의 속도가 빛속도에 가깝게 되므로 속도의 증가에 따르는 질량의 증가현상이 두드러지게 나타난다. 그러므로 가속장치들에서는 속도의 증가에 따르는 질량의 증가로 인하여 립자의 속도가 빛속도에 가까와질수록 립자를 가속시키기가 점점 어려워진다.

에네르기

특수상대성리론에서 얻어지는 중요한 결과의 하나는 질량과 에네르기사이의 관계이다. 특수상대성리론에서는 질량과 에네르기사

이에 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$E=\frac{m_0c^2}{\sqrt{1-\frac{v^2}{c^2}}}=mc^2 \quad \text{아인슈타인공식}$$

속도의 크기 v가 빛속도에 비하여 아주 작은 경우에 웃식은 다음과 같이 쓸수 있다.

$$E\approx m_0c^2+\frac{m_0v^2}{2}$$

이때 $E_0=m_0c^2$은 물체가 멎어있을 때($v=0$일 때) 가지게 되는 에네르기로서 **정지에네르기**라고 부른다.

뉴톤력학에서는 정지에네르기라는 개념자체가 없었지만 특수상대성리론에서는 정지에네르기에 대하여 생각하게 된다. 이러한 정지에네르기가 실제적으로 존재한다는것은 π^0메존의 붕괴현상을 통하여 실험적으로 확인할수 있다. π^0메존은 불안정한 립자이다. 이 립자가 붕괴될 때에는 립자가 소멸되면서 전자기파가 복사되게 된다. 이 립자가 붕괴되기 전에 정지질량 m_{π^0}을 가지고 정지상태에 있었다면 붕괴될 때 복사되는 전자기파의 에네르기는 바로 $m_{\pi^0}c^2$과 정확히 일치한다는것이 실험적으로 알려졌다.

에네르기가 ΔE만큼 변하면 질량은

$$\Delta m=\frac{\Delta E}{c^2} \quad \text{질량변화와 에네르기변화사이의 관계식}$$

만큼 변한다는것을 알수 있다.

다시말하여 물체의 에네르기가 변하면 그에 대응하여 질량의 변화가 동반된다.

핵반응과정에 질량의 변화에 해당한 거대한 에네르기가 방출된다는 사실도 바로 이러한 사실과 관련되여있다. 그러나 보통의 경우에 화학반응에서나 물체의 가열시에 에네르기의 변화는 아주 작기때문에 질량의 변화는 관측되지 않는다.

문제

1. 정지질량이 10g인 립자의 속도를 $0.99c$ 되게 하면 운동질량

이 얼마로 되겠는가?

2. 정지질량이 1g 이고 속도가 $0.9c$ 인 립자의 에네르기를 구하여라.

3. 다음의 문장들에서 옳은 점과 틀린 점을 찾아내여라.

ㄱ) 정지질량이 령인 립자도 에네르기를 가질수 있다.

ㄴ) 바께쯔에 담은 더운물을 식힐 때 물의 질량은 변하지 않는다.

자료 질량증가현상

우주로케트의 속도 v =10km/s에서 $\sqrt{1-v^2/c^2} \approx 0.999\ 999\ 999\ 44$ 이라는 사실을 고려하면 그리 크지 않은 속도에서는 속도에 따르는 질량의 증가가 알리지 않는다는것을 알수 있다.

그러나 현대적인 가속장치들에서는 빛속도보다 수십m/s만큼 약간 작은 속도까지 전자를 가속시킬수 있으며 이러한 경우에는 전자의 질량이 2 000배 정도 커지게 된다.

복습문제(1)

1. 특수상대성리론은 어떤 원리에 기초하고있는가?

2. 갈릴레이의 상대성원리와 아인슈타인의 상대성원리는 무엇이 차이나는가?

3. 100km/h의 속도로 달리는 렬차안에 탄 사람이 렬차가 가는 방향으로 전지불을 비쳤다. 기차를 타고있는 사람과 땅우에 서 있는 사람은 전지불이 퍼져나가는 속도를 얼마로 재는가?

4. 로케트가 지구에 멎어있는 관측자에 대하여 $0.99c$의 속도로 운동한다. 로케트와 함께 운동하는 계에서 시간이 1a동안 흘러가는 사이에 지구에 있는 계에서는 시간이 얼마나 흘러가겠는가?

(**답.** 약 7.1a)

5. 멎어있던 물체가 속도 $v=0.8c$ 를 가지고 운동한다면 물체의 밀도는 몇배 변화되는가? (**답.** 약 2.78배)

6. 정지질량이 10t인 로케트가 8km/s의 속도로 날 때 질량이 얼마나 커지겠는가? (**답.** 약 3.56mg)

7. 전자의 정지에네르기는 $m_0c^2=0.511\text{MeV}$ 이다. 전자의 속도가 $v=0.8c$ 인 경우에 전자의 운동에네르기를 구하여라.

(**답.** 0.34MeV)

8. 운동하는 립자의 질량은 정지질량보다 n배 크다. 이때 전에네르기는 정지에네르기의 n배이고 운동에네르기는 정지에네르기의 n-1배로 된다는것을 증명하여라.

9. 1kg의 물의 온도를 50℃만큼 올릴 때 질량은 얼마나 증가하는가? (**답.** 약 2.3×10^{-12}kg)

복습문제(2)

1. 등속직선운동하는 렬차안에서 구를 떨구면 직선으로 떨어진다. 이것을 땅우에 멎어있는 관찰자가 보면 포물선운동을 한다. 두 계는 다 관성계이다. 그러면 서로 다른 관성계들에서 력학적운동이 동일하게 일어난다는 갈릴레이의 상대성원리에 모순되지 않는가?

2. 동시각의 상대성, 시간의 지연현상에서 빛속도불변성이 어떻게 반영되는가?

3. 다음 문장에서 옳은것과 틀린것을 지적하고 그 근거를 밝혀라.

ㄱ) 운동하는 관성계에서는 정지관성계에서보다 시간이 천천히 흐른다.

ㄴ) 운동하는 막대기의 길이는 모든 방향에서 다 짧아진다.

4. 우주비행선을 타고 려행하는 두 우주려행가가 우주비행선안에서 1h동안 장기경기를 하였다. 지구에서 TV로 이들의 경기를 본 사람들은 경기가 1.02h 진행된것으로 알고있다면 지구에 대한 우주비행선의 속도는 얼마인가? (**답.** 0.197c)

5. 길이와 너비의 비가 2:1인 직4각형모양의 논판이 있다. 그 모양이 바른4각형으로 보이자면 로케트는 논판에 대하여 어느 방향으로 얼마만한 속도로 운동하는가? (**답.** 약 0.87c)

6. 뉴톤력학과 상대론적력학에서 운동량의 변화와 힘사이의 관계는 같은 모양 즉 $F=\dfrac{\Delta P}{\Delta t}$로 표시된다. 그러나 이 식의 물리적 의미는 다르다. 이것을 설명하여라.

7. 어느 한 TV중계소에서 전자기파의 복사로 인하여 1h동안에 3.6×10^{-11}kg의 질량을 공간에 내보내는것으로 된다고 한다. 이 중계소의 출력을 구하여라. (**답.** 900W)

8. 정지질량이 령인 립자는 어떤 속도로 운동하는가?

제7장. 원자핵과 소립자

20세기 물리학분야에서 거둔 가장 큰 성과의 하나는 원자핵과 소립자에 대한 연구가 본격적으로 진행되여 그 연구결과들이 경제발전에 크게 기여한것이다.

원자핵의 구조와 성질이 밝혀지고 방사성동위원소와 방사선이 인민경제 여러 부문에 광범히 리용되고있으며 원자핵속에 숨어있는 방대한 에네르기를 찾아내여 미래의 동력문제를 해결할 전망이 열리게 되였다.

원자핵과 소립자에 대한 지식은 우주개발사업을 비롯한 첨단과학기술분야들에 필요한 기초지식으로 된다.

이 장에서는 원자핵의 구조와 핵의 결합에네르기, 방사선과 그 리용, 원자력의 리용과 소립자세계에 대한 기초지식을 준다.

제1절. 원자핵의 구조

우리가 잘 아는것처럼 모든 물질들은 원자로 이루어져있으며 원자는 핵과 전자들로 이루어져있다.

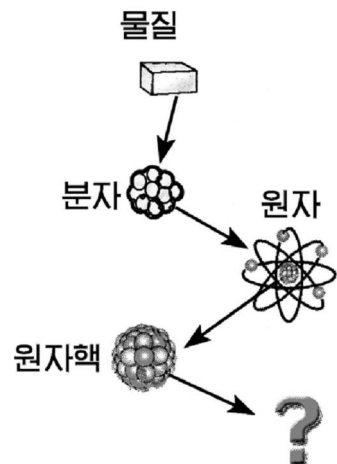
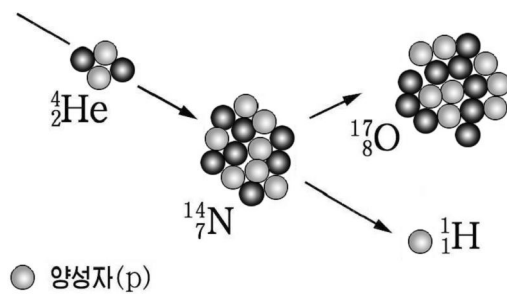
그러면 원자핵은 더 나눌수 없겠는가.(그림 7-1) 이것을 알아보려면 원자핵을 《깨뜨려》보아야 한다.

그림 7-1. 핵은 무엇으로 이루어졌는가

핵은 무엇으로 이루어졌는가

양성자. 1919년 물리학자 라자포드는 핵의 구조를 알아보기 위하여 헬리움원자핵($^{4}_{2}He$)으로 질소원자핵을 타격하는 실험을 진행하였다. 이때 질소원자핵으로부터 가장 가벼운 수소원자핵이 나왔다.(그림 7-2)

그림 7-2. 양성자발견실험

이처럼 핵안에는 수소원자핵이 들어있는데 이 수소원자핵($^{1}_{1}H$)을

양성자(프로톤)라고 부른다.

양성자는 질량이

$$m_P=1.672\ 623\times10^{-27}\text{kg}$$

으로서 전자질량의 1 836배이며 전자의 전기량과 크기가 같고 부호가 +인 립자이다.

이로부터 원자번호가 Z인 원자는 Z개의 양성자와 Z개의 전자로 이루어졌다고 보아야 할것이다.

중성자. 원자핵들의 질량을 측정해보면 그것이 Z개의 양성자들의 질량의 합보다 거의 2배이상이나 크다. 이것은 원자핵속에는 양성자외에도 다른 립자들이 더 들어있다는것을 의미한다. 1932년에 영국의 물리학자 챠드위크는 헬리움원자핵으로 베릴리움원자핵을 타격하는 실험을 진행하였다.(그림 7-3)

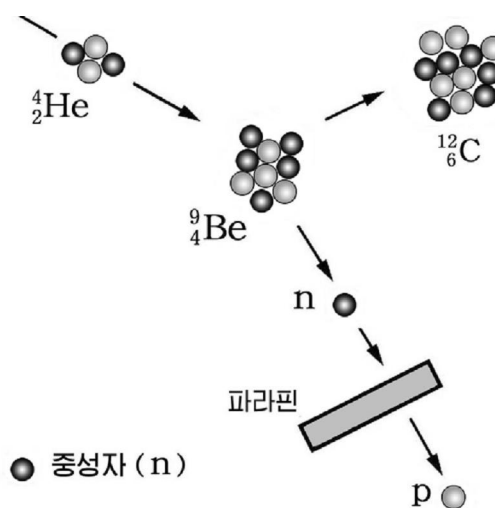



그림 7-3. 중성자발견실험

이 실험에서 헬리움원자핵을 흡수한 베릴리움원자핵으로부터 나오는 투과력이 센 립자는 전기를 띠지 않아 관측하기 어려우므로 파라핀(수소원자를 많이 포함한것)을 통과시켜 이때 생겨나는 양성자를 관측하였다.

여기로부터 헬리움원자핵으로 베릴리움원자핵을 타격하면 양성자보다는 질량이 약간 더 크고 전기를 띠지 않은 립자가 나온다는것을 알아내였다.

이처럼 양성자보다 질량이 약간 더 크고 전기를 띠지 않는 립자를 **중성자(뉴트론)**라고 부른다.

중성자의 질량은

$$m_n=1.674\ 928\times10^{-27}\text{kg}$$

핵의 구조. 우의 두 실험으로부터 원자핵은 양성자와 중성자로 이루어졌다는것을 알수 있다.(그림 7-4의 ㄱ)

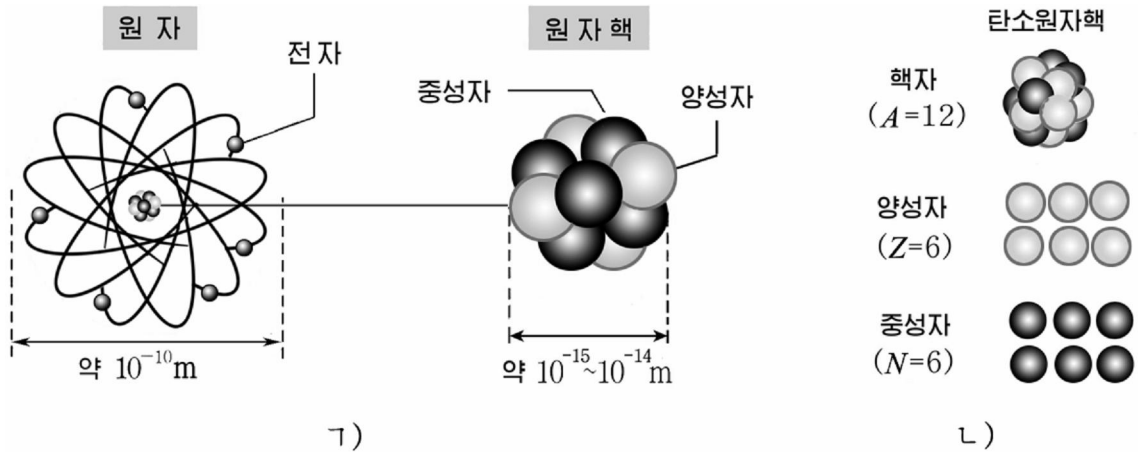



그림 7-4. 원자핵의 구조

실례로 탄소원자핵은 6개의 양성자와 6개의 중성자로 이루어져있다. (그림 7-4의 ㄴ)

원자핵을 이루고있는 양성자와 중성자를 통털어 **핵자**라고 부른다.

핵을 이루고있는 양성자의 수(**전하수**) Z와 중성자의 수 N을 합한 핵자수 A를 **질량수**라고 부른다. 즉

$$A=Z+N \quad \text{질량수}$$

원자핵은 원소기호와 함께 원소기호의 왼쪽 우에는 질량수 A를, 왼쪽 밑에는 전하수 Z를 붙여서 표시한다.

즉 $^{A}_{Z}X$ 원자핵의 표시법　　례: $^{23}_{11}Na$ 나트리움원자핵

동위핵과 동중핵

멘델레예브원소주기표를 보면 중성자수는 달라도 양성자수가 같은 원자들은 같은 수의 전자를 가지므로 같은 자리에 놓이며 그것들의 화학적성질도 같다.

이처럼 양성자수가 같고 중성자수가 다른 원자들을 **동위원소**라고 부르며 동위원소의 원자핵들을 **동위핵**이라고 부른다. (그림 7-5)

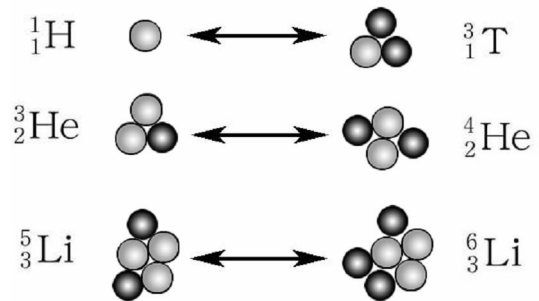



그림 7-5. 동위핵

동위핵들은 양성자수 Z는 같지만 중성자수 N이 다르므로 질량수 A가 다르다.

실례로 수소동위원소중에는 수소 $^{1}_{1}H$와 중수소 $^{2}_{1}D$, 초중수소

$^{3}_{1}$T가 있는데 이 원자핵들은 동위핵들이다.

동위원소들은 질량차이를 리용하여 물리적방법으로만 분리할수 있다.

원자핵들중에는 전하수는 다르지만 질량수가 같은 원자들도 있다.

질량수는 같지만 원자번호가 다른 원소들을 **동중원소**라고 부르며 동중원소의 원자핵들을 **동중핵**이라고 부른다.(그림 7-6)

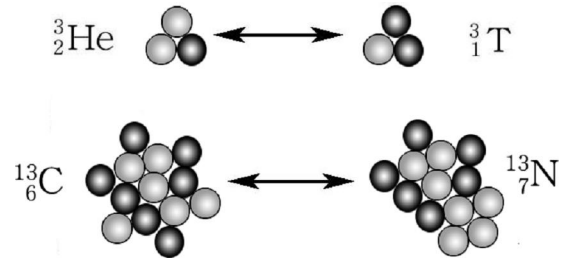



그림 7-6. 동중핵

실례로 헬리움핵 $^{3}_{2}$He과 초중수소핵 $^{3}_{1}$T은 동중핵들이다.

원자질량단위

원자나 원자핵과 같은 립자들의 질량은 매우 작으므로 kg단위를 쓰기 불편하다. 그러므로 원자핵의 질량을 표시하기 위하여 탄소 $^{12}_{6}$C원자 한개의 질량의 1/12을 질량의 단위 1D로 정하고 이것을 **원자질량단위**라고 부른다.

원자질량단위 1D를 kg단위로 표시하면 다음과 같다.

$$1D=\frac{^{12}_{6}C\text{원자질량}}{12}=1.660\,53\times10^{-27}\,kg \quad \text{원자질량단위}$$

몇가지 립자나 원자 한개의 질량을 원자질량단위로 나타내면 다음표와 같다.

핵자, 원자	질량[D]	원 자	질량[D]	원 자	질량[D]
양성자 p	1.007 28	중수소 $^{2}_{1}$H	2.014 10	리티움 $^{7}_{3}$Li	7.016 00
중성자 n	1.008 67	3중수소 $^{3}_{1}$H	3.016 05	질소 $^{14}_{7}$N	14.003 1
수소 $^{1}_{1}$H	1.007 83	헬리움 $^{4}_{2}$He	4.002 60	우라니움 $^{235}_{92}$U	235.044

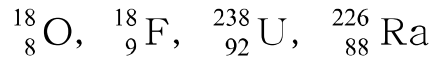
표에서 보는것처럼 원자질량단위로 표시한 수값과 근사한 옹근수가 바로 질량수 A이다. 멘델레예브원소주기표에 표시되여있는

원자량은 자연계에 있는 그 원소의 동위원소들의 평균질량을 원자질량단위로 계산한 수이다.

실례로 탄소는 $^{12}_{6}C$가 98.9%, $^{13}_{6}C$가 1.1% 들어있으므로 탄소의 원자량은 12D×0.989+13.003 4D×0.011=12.01D이다.

문제

1. 다음 문장에서 틀린 부분들을 고쳐라.
   ㄱ) 원자핵은 양성자와 전자, 중성자로 이루어져있다.
   ㄴ) 동중원소는 질량수가 같고 중성자수가 같으므로 멘델레예브원소주기표에서 같은 자리를 차지한다.
   ㄷ) 동위원소는 질량수가 달라도 양성자수가 같으므로 멘델레예브원소주기표에서 같은 자리를 차지한다.
   ㄹ) 질소의 원자량이 14이므로 질소원자핵의 핵자수는 14이고 질소원자 한개의 질량은 14g이다.
2. 원자질량단위의 크기가 $1D=1.660\ 53\times10^{-27}$kg임을 밝혀라.
3. 다음 핵들은 몇개의 양성자와 몇개의 중성자로 이루어져있는가?

$$^{18}_{8}O,\ ^{18}_{9}F,\ ^{238}_{92}U,\ ^{226}_{88}Ra$$

원자핵의 체적과 밀도

α 립자산란실험을 비롯하여 여러 연구결과에 의하면 핵의 반경은 질량수의 1/3제곱에 비례한다는것을 알수 있다. 따라서 원자핵의 체적은 질량수 A에 비례한다. 이것은 핵의 체적을 질량수로 나눈 값 즉 양성자나 중성자 한개의 체적은 거의 같다는 것을 의미한다. 일반적으로 핵의 질량은 $M=A\times1D=A\times1.66\times10^{-27}$kg으로 계산하며 핵의 밀도는 다음과 같다.

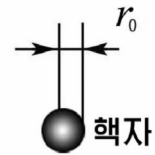
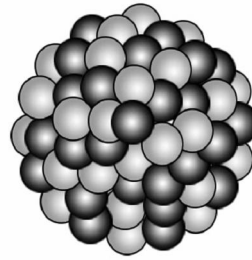



그림 7-7. 원자핵의 모양

$$\rho=\frac{M}{V}=\frac{A\times1.66\times10^{-27}}{\frac{4}{3}\pi R^3}\approx2.3\times10^{17}\ (\mathrm{kg/m^3})$$

즉 모든 핵에서 밀도는 거의 같으며 그 값은 매우 크다.

제2절. 핵력과 결합에네르기

원자를 수만K까지 가열하면 빛을 내거나 이온화될수 있지만 원자핵은 변하지 않는다. 이것은 원자핵이 매우 세게 결합되여 대단히 견고하다는것을 보여준다.

그러면 핵자들사이에 어떤 힘이 작용하며 핵자들을 떼내기 위해서는 얼마의 에네르기가 필요하겠는가.

핵력과 그 특성

핵안에 있는 핵자들사이에는 전기적밀힘이나 만유인력(끌힘)이 작용한다.

전기적밀힘은 양성자들사이에서만 작용하는 센 밀힘으로서 핵자들을 결합시키는 힘은 아니다. 또한 두 핵자들사이에 작용하는 만유인력은 전혀 보잘것 없는 대단히 작은 끌힘이다. 이로부터 핵안에서 핵자들사이에는 만유인력이나 전기적밀힘외에 매우 센 끌힘이 작용한다는것을 알수 있다.

핵안에서 핵자들사이에만 작용하는 매우 센 끌힘을 **핵력**이라고 부른다.

❓ 핵력은 다른 힘들과 어떻게 다른가.

핵력은 우선 매우 센 힘이다. 핵안에서 핵자들사이에 작용하는 핵력은 양성자들사이에 작용하는 전기적밀힘보다 약 100배정도, 핵자들사이에 작용하는 만유인력보다는 10^{38}배정도로서 대단히 센 힘이다.

핵력은 또한 전기량에는 관계없이 작용하는 힘이다. 핵안에서 전기힘은 양성자와 양성자사이에만 작용한다. 그러나 핵력은 양성자와 양성자사이, 양성자와 중성자사이, 중성자와 중성자사이에도 같은 크기로 작용한다.

다음으로 핵력은 매우 가까운 거리에서만 세게 작용하며 거리가 멀어지면 급격히 작아지거나 거의 없어지는 힘이다. 핵들이 가까와져서 2×10^{-15}m(핵자의 크기)정도로 되면 센 핵력이 생기며 거리가 조금만 멀어져도 핵력은 매우 빨리 작아진다. 그러므로 한개 핵자는 핵력의 작용구(핵력이 미치는 공간범위)안에 있는 핵자와만 힘을 주고받는데(포화성) 그속에 들어오는 핵자수가 제한되므

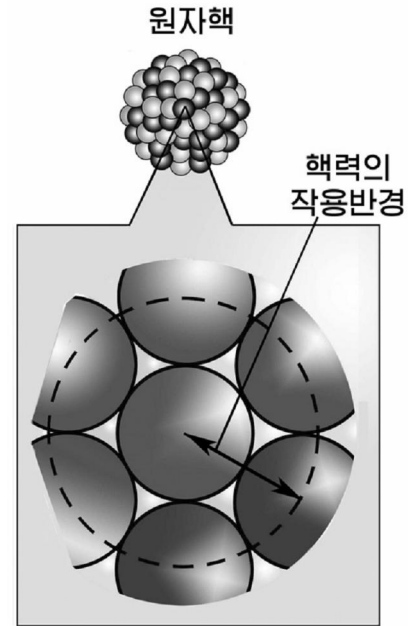
로 자기 주위의 몇개의 핵자들과만 호상 작용을 한다.(그림 7-8)

그림 7-8. 핵력의 작용반경

핵의 결합에네르기와 질량결손

❓ 핵자들이 세게 결합되여있는 정도를 어떻게 평가하겠는가.

세게 결합된 핵자들을 떼여내자면 밖으로부터 에네르기를 주어야 한다. 실례로 중수소핵 ${}_{1}^{2}\mathrm{D}$에 약 2MeV정도의 에네르기를 주면 양성자와 중성자로 갈라진다.

더 많은 핵자들로 이루어진 핵에서 핵자들을 따로따로 갈라놓자면 더 많은 에네르기를 주어야 한다. 원자핵을 이루고있는 핵자들을 모두 따로따로 떼여놓는데 필요한 에네르기를 핵의 **결합에네르기**라고 부른다.

핵을 개개의 핵자들로 갈라놓으려면 핵에 결합에네르기만 한 큰 에네르기를 주어야 한다. 이것은 물분자들이 모여 물방울을 이룰 때 에네르기를 내보내고 반대로 물방울을 개개의 물분자들로 갈라내려면 그만 한 에네르기를 주어야 하는것과 비슷하다.

❓ 핵의 결합에네르기는 어떻게 구할수 있는가.

원자핵의 질량은 언제나 그것을 이루는 핵자들의 질량을 합한 것보다 작다. 즉 핵을 이룰 때 계의 질량은 감소한다.

원자핵을 이루는 개별적핵자들의 질량의 총합에서 원자핵의 질량을 던 차를 **질량결손**이라고 부른다. 따라서 Z개의 양성자와 N개의 중성자로 이루어진 핵에서 질량결손은 다음과 같다.

$$\Delta m = Zm_{\mathrm{P}} + Nm_{\mathrm{n}} - M \quad \text{질량결손}$$

핵의 결합에네르기는 상대성리론에서 에네르기의 변화와 질량변화사이의 관계식 $\Delta E = \Delta m c^2$에 의하여 구하면 다음과 같다.

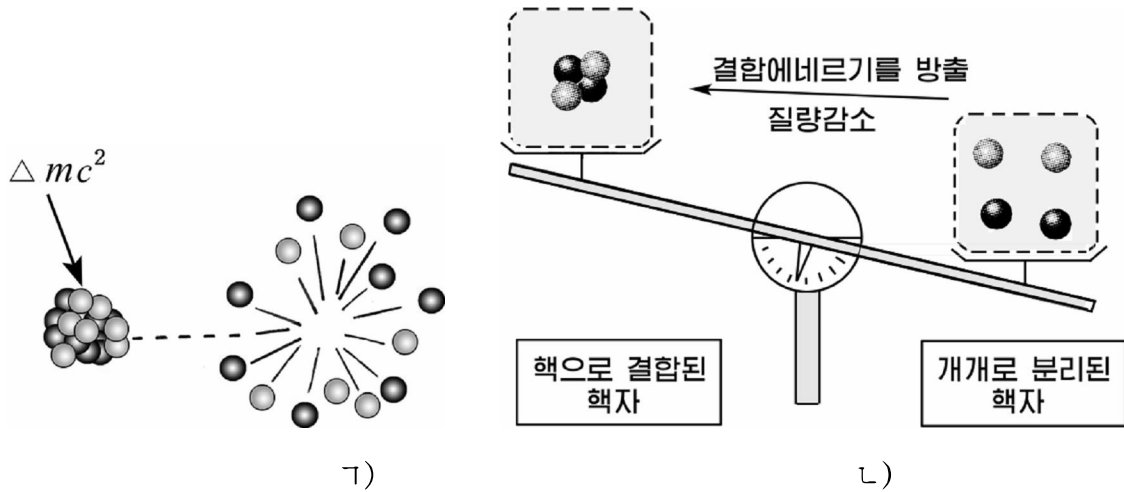
$$\Delta E = \Delta m c^2 = (Zm_{\mathrm{P}} + Nm_{\mathrm{n}} - M)c^2 \quad \text{결합에네르기}$$

※ 일반적으로 계산할 때에는 $Zm_{\mathrm{P}} \approx Z(m_{\mathrm{P}} + m_e)$ 으로, M은 해당한 동위원소의 원자핵의 질량으로 한다.

핵에 외부로부터 결합에네르기만 한 에네르기를 주어 핵자들을 따로따로 떼놓으면 에네르기는 늘고 질량도 늘어난다.(그림 7-9의 ㄱ)

또한 개별적핵자들이 결합되여 원자핵을 이룰 때에는 결합에네르기만 한 에네르기를 밖으로 내보내므로 에네르기가 줄고 따라서 질량도 줄어든다.(그림 7-9의 ㄴ)

그림 7-9. 원자핵의 결합에네르기

비결합에네르기

핵의 결합에네르기는 핵자수에 비례하므로 핵자수가 다른 핵들가운데서 어느 핵이 더 견고한가를 평가하기는 힘들다.

주어진 핵안에서 핵자들이 얼마나 세게 결합되여있는가를 평가하자면 한개 핵자에 해당되는 결합에네르기값을 따져보아야 한다.

핵안에서 핵자 한개를 떼내는데 드는 에네르기를 핵의 **비결합에네르기**라고 부른다.

핵의 비결합에네르기는 핵의 결합에네르기를 핵의 질량수로 나누어 얻는다.

$$f = \frac{\Delta E}{A} \quad \text{비결합에네르기}$$

※ 일반적으로 핵을 구성하는 매개 핵자들을 떼내는데 드는 에네르기는 차이나며 핵의 비결합에네르기는 그 값들을 평균한것이다.

비결합에네르기가 큰 핵일수록 더 공고하고 안정한 핵이다. 질량수에 따르는 비결합에네르기변화를 그라프로 표시하면 그림 7-10과 같다.

그림 7-10. 질량수에 따르는 핵의 비결합에네르기

그라프에서 알수 있는바와 같이 비결합에네르기는 A가 60정도인 핵에서 8.6MeV정도로서 가장 크다.

이것은 질량수가 60정도인 핵이 가장 안정하다는것을 의미한다.

또한 그라프에서 질량수가 작은 핵들가운데도 비결합에네르기가 특별히 큰 핵들이 일부 있으며 이 핵들도 역시 안정하다.

그러나 질량수가 120이상으로 큰 핵들과 질량수가 20이하인 가벼운 핵들은 대체로 비결합에네르기값이 작으며 이것은 그 핵들이 불안정하다는것을 의미한다.

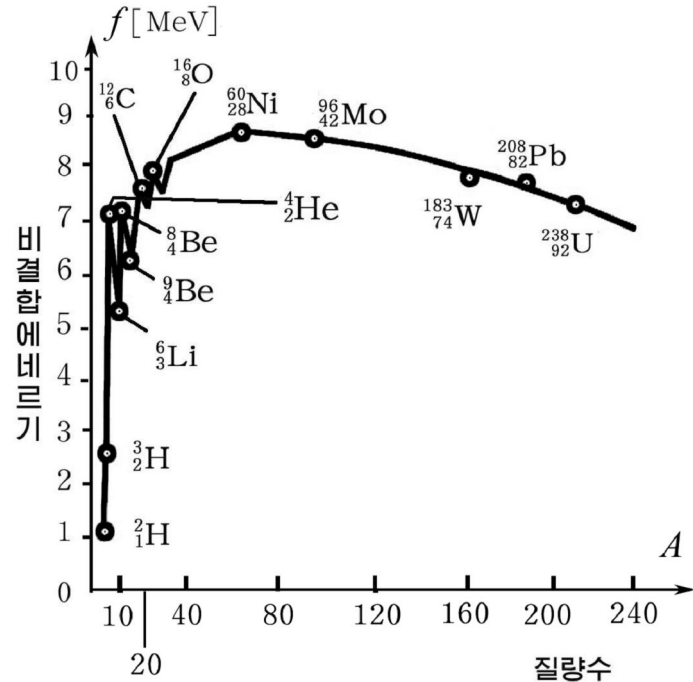
질량수가 큰 무거운 핵들은 불안정하므로 분렬되면 더 안정한 핵으로 되며 질량수가 작은 가벼운 핵들도 불안정하여 융합될 때 더 안정한 핵으로 된다.

[례제] 헬리움원자핵은 2개의 양성자와 2개의 중성자로 이루어져있으며 그의 질량은 4.002 6D이다. 헬리움원자핵의 결합에네르기와 비결합에네르기는 얼마인가?

풀이. 주어진것: $M=4.002\,6\text{D}$, $Z=2$, $N=2$

$m_{\text{P}}=1.007\,28\,\text{D}$, $m_{\text{n}}=1.008\,67\text{D}$

구하는것: ΔE?, f?

결합에네르기는

$$\Delta E = \Delta mc^2 = [(Zm_{\mathrm{P}} + Nm_{\mathrm{n}}) - M]c^2 =$$
$$= [(2\times 1.007\,28 + 2\times 1.008\,67) - 4.002\,6]\times 1.660\,53\times 10^{-27}\times$$
$$\times (3\times 10^8)^2 \approx 44\times 10^{-13}(\mathrm{J}) = 27.5(\mathrm{MeV})$$

비결합에네르기는 $f = \frac{\Delta E}{A} = \frac{27.5}{4}$MeV=6.88MeV

답. 27.5MeV, 6.88MeV

문제

1. 핵력이 있다는것을 어떻게 알수 있는가? 두 양성자들사이에 작용하는 핵력, 만유인력, 전기힘을 비교하여라.
2. 질량 1D에 해당한 에네르기는 몇eV인가?
3. 산소원자핵 $^{16}_{8}\mathrm{O}$ 의 질량은 $m = 15.994\,9$D이다. 산소원자핵의 비결합에네르기는 얼마인가?

제3절. 방사선

방사선의 발견은 렌트겐선의 발견과 함께 가장 중요한 발견들중의 하나이다. 방사선의 발견으로 원자핵의 구조가 밝혀지게 되였으며 물질세계의 본질을 해명하는데서 커다란 전진이 이룩되였다.

방사선

1896년 어느날 베크렐은 이상한 현상을 발견하였다.

우라니움이 들어있는 광석과 함께 암실책상안에 넣어두었던 검은 종이에 싼 사진건판을 현상해보았는데 놀랍게도 우라니움덩어리의 모양이 뚜렷이 찍혀있었던것이다. 진지한 연구끝에 베크렐은 우라니움광석자체에서 눈에 보이지 않는 강한 빛이 복사된다는것을 알아내였다. 이 빛은 우라니움원자핵이 내보낸것이다.

그후 물리학자 큐리는 이에 대하여 더 깊이 연구하는 과정에 이 복사선의 본질을 밝혀냈으며 복사선을 내는 새로운 원소인 폴로니움과 라디움을 발견하였다.

원자핵이 외부작용이 없이 스스로 내보내는 눈에 보이지 않는 복사선을 **방사선**이라고 부른다.

방사선을 내는 성질을 **방사성**, 방사성을 가진 물질을 **방사성물질,**

방사성을 가진 원소를 **방사성원소**라고 부른다.

천연방사성물질에서 나오는 방사선이 어떤 선인가를 알아보기 위하여 방사선이 지나가는 방향에 수직으로 자기마당이나 혹은 전기마당을 작용시키고 자리길이 구부러지는 정도를 따져보면 방사선이 세 방향으로 갈라지는것을 알수 있다.(그림 7-11)

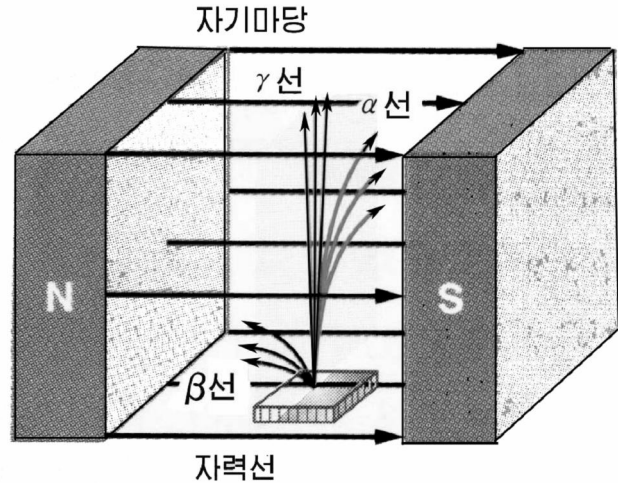



그림 7-11. 방사선의 세 성분

α선. 자기마당의 작용으로 약하게 기울어지는 방사선을 **α선**이라고 부른다.

α선이 자기마당속에서 구부러지는 정도와 방향을 따져보면 그것이 +전기를 띤 무거운 립자들의 흐름이며 그것의 전하수는 2, 질량수는 4라는것을 알수 있다. 즉 α선은 10^4km/s의 속도로 운동하는 헬리움원자핵($^4_2\mathrm{He}$)들의 흐름이다.

β선. 자기마당속에서 α선과 반대쪽으로 세게 기울어지는 방사선을 **β선**이라고 부른다.

β선이 자기마당속에서 α선과 반대방향으로 세게 구부러지는 정도를 재여보면 그것이 −전기를 띤 가벼운 립자들의 흐름이며 그의 전하수가 −1이라는것을 알수 있다.

즉 β선은 $0.99c$의 속도를 가진 전자($-e$)들의 흐름이다.

γ선. 자기마당속에서 기울어지지 않고 곧추 나가는 방사선을 **γ선**이라고 부른다.

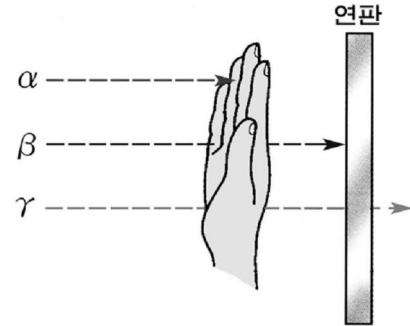
γ선은 자기마당의 작용을 받지 않는것으로 보아 전기를 띠지 않은 립자들의 흐름이라는것을 알수 있다. γ선의 본질이 에돌이실험결과에 밝혀졌다.

γ선은 렌트겐선보다 진동수가 더 큰 전자기파 즉 빛량자들의 흐름이다. 이 빛량자의 에네르기는 0.05∼10MeV이다.

방사선의 성질

방사선은 물질속의 원자와 충돌하여 그것을 이온화시키거나 빛을 내게 하고 분자와 충돌하여 그것을 원자로 갈라놓기도 하며 생물체의 세포를 파괴하기도 한다.

그림 7-12. 방사선의 작용

방사선의 이러한 작용은 α선, β선, γ선에서 그 정도가 서로 다르다.(그림 7-12)

α선은 물질을 이루는 원자나 분자와 세게 작용하며 물질층을 잘 뚫고나가지 못한다. 그러므로 손바닥이나 0.3mm정도의 연판으로도 막을수 있다.

β선은 α립자보다는 약하나 γ선보다는 물질과 세게 작용하며 수mm정도의 연판으로 막을수 있다.

γ선은 물질원자와 약하게 작용하며 물질층을 잘 뚫고나가므로 수cm정도의 연판으로도 막을수 없다.

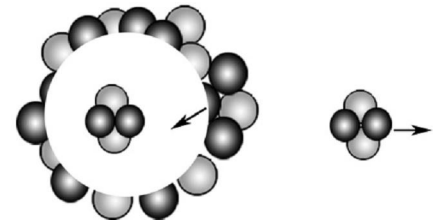
이처럼 물질에 대한 방사선의 작용은 질량과 전기량에 관계되며 α선이 제일 세고 γ선이 제일 약하다.

이온화능력이 세면 그만큼 에네르기가 소모되므로 투과능력이 약하다.

방사선의 원인

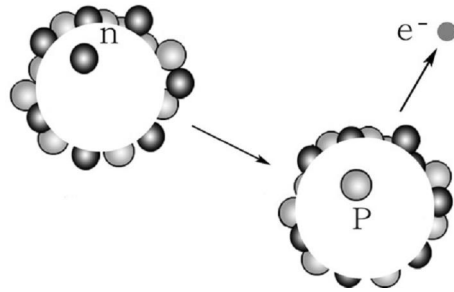
방사선이 어떻게 나오는가를 따져보자.

α선의 원인. 물질을 이루는 원자는 핵과 전자로 이루어져있으므로 α선($^4_2$He핵의 흐름)은 원자핵으로부터만 나올수 있다. 방사성핵속의 핵자들중에서 각각 두개의 양성자들과 중성자들이 결합되여 α립자가 생긴다. 이 α립자가 핵밖으로 나오는것이 α선이다.(그림 7-13)

그림 7-13. α선의 원인

β선의 원인. 방사성물질을 극저온상태나 수천K의 높은 온도상태에 넣어도 β선이 변함없이 복사되는것은 역시 핵으로부터만 나올

수 있다는것을 보여준다.

핵속에는 전자가 없다. 그러나 핵속의 중성자가 양성자와 전자로 전환될 때 전기량보존법칙으로부터 전자가 생기며 이때 양성자는 핵속에 남고 전자만이 밖으로 나오는데 이것이 β립자이다.(그림 7-14)

그림 7-14. β선의 원인

γ선의 원인. γ선의 에네르기는 원자안의 전자가 가지는 에네르기보다 비할바없이 크므로 역시 원자핵에서만 나올수 있다.

방사성원자핵은 α립자나 β립자를 내보낸 후 불안정한 상태에 있게 되며 보다 안정한 상태에로 이행하면서 그 에네르기차만 한 에네르기를 가진 γ량자를 내보내는것이다.(그림 7-15)

따라서 γ량자를 내보낸 원자핵은 다른 핵으로 넘어가지 않고 그 핵의 에네르기만이 줄어든다.

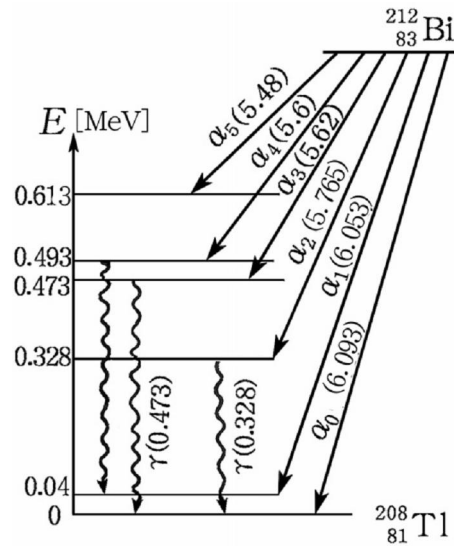



그림 7-15. γ선의 원인

원자에서의 전자층과는 달리 핵에서는 에네르기준위사이의 간격이 MeV정도로 크므로 복사되는 γ선의 파장이 보임빛이나 X선보다도 매우 짧은것이다.

[례제] 방사선이 지나가는 방향에 수직으로 작용시킨 전기마당속에서 방사선의 자리길이 어떻게 구부러지겠는가를 설명하여라.

풀이. α선은 +전기를 띠였으므로 전기마당속에서 전기힘을 받아 전기마당과 같은 방향으로 기울어진

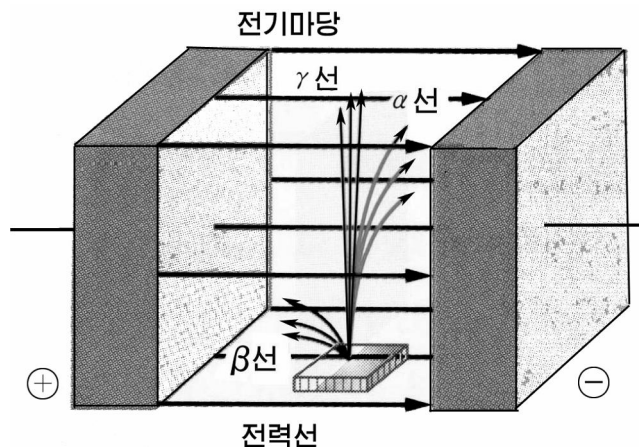



그림 7-16

다.(그림 7-16)

β 선은 －전기를 띠였으므로 전기마당과 반대방향으로 기울어진다.

γ 선은 전기를 띠지 않았으므로 곧추 나간다.

문제

1. 방사선의 특성을 다음의 표에 써넣어라.

방 사 선	α 선	β 선	γ 선
기 호			
본 성			
전기 및 자기마당의 영향			
이온화능력	1		1/10 000
물질을 뚫고나가는 능력		100	

표에서 α 립자의 이온화능력을 1로 보았다.

2. γ 선은 왜 물질을 잘 뚫고 지나가며 이 성질을 어디에 리용할 수 있는가?
3. α 선, β 선, γ 선가운데서 어느 선이 원자를 더 잘 이온화시키며 그 까닭은 무엇인가?

마리야 큐리

마리야 큐리(1867-1934)는 세계의 첫 녀성과학자이며 2중노벨수상자이다.

프랑스 빠리대학을 최우등으로 졸업한 그는 베크렐선의 정체를 밝히는 박사론문을 쓰기로 결심하였다. 당시 학자들은 력청우라니움광석에 있는 우라니움에서만 강한 방사선이 나온다고 보았으므로 우라니움을 뺀 《찌꺼기》에서는 방사선이 나오지 않는다고 생각하였다. 큐리부인은 고심어린 작업끝에 우라니움을 모조리 뽑아버리였다.

그날 저녁 실험설비들을 정돈하던 큐리부인은 전기를 띠고있지 않던 검전기의 알루미니움띠가 움직이는것을 보고 깜짝 놀랐다. 방사선을 세게 내는 어떤 물질이 검전기주위에 있는것이 틀림없었다. 그후 큐리부인은 비스무트화합물속에서 방사능이 우라니움보다 400배나 더 큰 새로운 원소를 발견하고 《폴로니움》이라고 불렀다.

진지한 연구끝에 또 다른 화합물인 바리움화합물에서 방사능이 우라니움보다 더 센 원소를 또 하나 발견하고 거기에 《라디움》이라는 이름을 붙였다.

제4절. 방사성붕괴법칙

자연계에 존재하는 많은 종류의 원자핵들은 안정하여 방사선을 내보내지 않지만 일부 원자핵들은 외부작용을 받지 않아도 스스로 방사선을 내보낸다.

방사선을 내보낸 방사성물질은 어떻게 변하겠는가.

방사성붕괴와 변위규칙

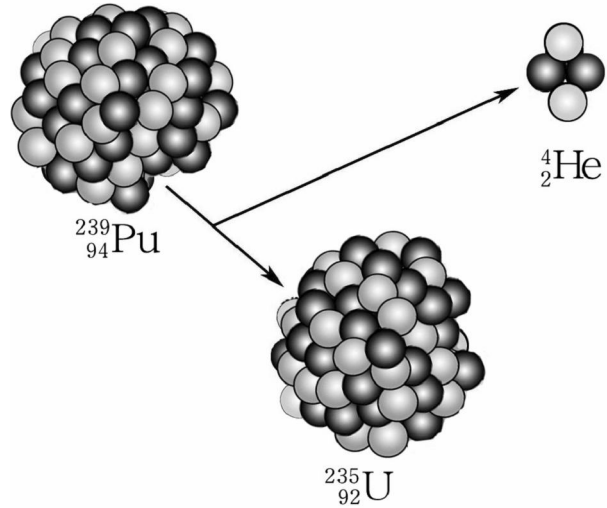
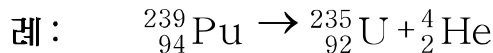
방사성원소의 불안정한 핵이 방사선을 내보내면서 다른 핵으로 넘어가는것을 **방사성붕괴**라고 부른다.

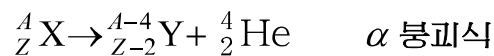
방사성붕괴에는 세가지 형태가 있다.

α 붕괴. 원자핵이 α 립자를 내보내고 다른 핵으로 되는 방사성붕괴를 **α 붕괴**라고 부른다.

그림 7-17. α 붕괴

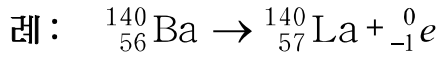
원자핵이 α 립자를 내보내면 핵의 전하수는 2만큼, 질량수는 4만큼 줄어든다.(그림 7-17)

례: $$^{239}_{94}\mathrm{Pu} \rightarrow {}^{235}_{92}\mathrm{U} + {}^{4}_{2}\mathrm{He}$$

α붕괴전후에 질량수와 전하수가 보존된다는것을 고려하면 α 붕괴의 일반식은 X를 붕괴전 원자핵, Y를 붕괴후 원자핵으로 표시할 때 다음과 같다.

$$^{A}_{Z}\mathrm{X} \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}\mathrm{Y} + {}^{4}_{2}\mathrm{He} \qquad \alpha \text{ 붕괴식}$$

β 붕괴. 원자핵이 β 립자를 내보내고 다른 핵으로 전환되는것을 **β 붕괴**라고 부른다.

전자의 질량수가 령이므로 원자핵이 β 립자를 내보내면 핵의 질량수는 변하지 않고 전하수만 1만큼 커진 동중핵으로 된다.(그

림 7-18)

례: $^{140}_{56}\text{Ba} \rightarrow ^{140}_{57}\text{La} + ^{0}_{-1}e$

β 붕괴는 일반적으로 다음과 같이 표시된다.

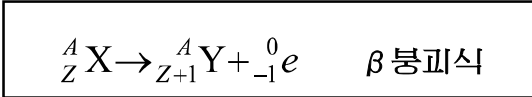
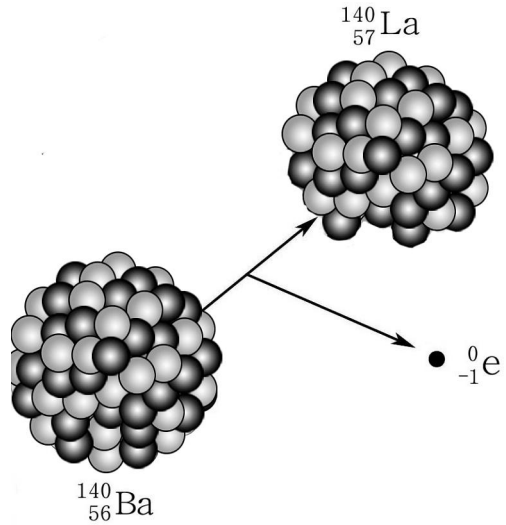
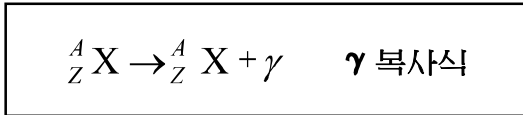
$^{A}_{Z}\text{X} \rightarrow ^{A}_{Z+1}\text{Y} + ^{0}_{-1}e$　　β 붕괴식

※ β 붕괴에는 전자($^{0}_{-1}e$)를 내보내는 β^{-} 붕괴와 양전자($^{0}_{+1}e$)를 내보내는 β^{+} 붕괴, 전자층의 전자를 포획하는 전자포획이 속한다.

그림 7-18. β 붕괴

γ 붕괴. α붕괴 혹은 β붕괴후 새로 생긴 원자핵들은 불안정한 상태에 있게 되며 이 핵들은 안정한 상태로 넘어가면서 γ량자를 내보낸다.

려기된 원자핵이 보다 낮은 려기상태 또는 바닥상태로 이행하면서 빛량자를 방출하는 현상을 **γ 붕괴** 혹은 **γ 복사**라고 부른다.

γ붕괴를 할 때 전하수와 질량수는 모두 변하지 않는다.

γ 붕괴는 다음과 같이 표시된다.

$^{A}_{Z}\text{X} \rightarrow ^{A}_{Z}\text{X} + \gamma$　　**γ 복사식**

실례로 토리움 $^{228}_{90}\text{Th}$는 α립자를 내보내고 라디움 $^{224}_{88}\text{Ra}$으로 되는데 이때 생긴 라디움 $^{224}_{88}\text{Ra}$는 불안정한 상태에 있다가 안정한 상태로 넘어가면서 γ량자를 내보낸다.

이상의 내용을 종합하면 방사성붕괴에 대한 다음과 같은 **변위규칙**을 얻는다.

첫째로, α 붕괴를 일으키면 전하수는 2만큼, 질량수는 4만큼 줄어든다.

둘째로, β 붕괴를 일으키면 질량수는 변하지 않으며 전하수는 1만큼 늘어난다.

셋째로, γ선을 내보낼 때에는 전하수와 질량수가 변하지 않는다.

넷째로, 방사성붕괴의 전후에 질량수와 전하수는 보존된다.

방사성붕괴법칙

방사성원자핵들은 방사성붕괴되면 다른 핵으로 전환되므로 그 방사성원자핵의 개수가 줄어든다.

방사성원자핵이 얼마나 빨리 붕괴되는가를 반감기와 방사능으로 표시한다.

몇가지 방사성물질의 반감기

핵	반감기	핵	반감기	핵	반감기
$^{238}_{92}U$	4.5×10^{9}a	$^{226}_{88}Ra$	1 620a	$^{24}_{11}Na$	15.06h
$^{11}_{6}C$	20.4min	$^{60}_{27}Co$	5.2a	$^{9}_{3}Li$	0.89s
$^{14}_{6}C$	5 720a	$^{222}_{86}Rn$	3.83d	$^{212}_{84}Po$	2×10^{-7}s

핵이 붕괴되여 원자핵의 수가 절반으로 줄어드는데 걸리는 시간을 **반감기**라고 부른다.

주어진 방사성물질에서 반감기는 항상 일정하다.

반감기는 방사성원소의 종류에 따라 다르며 반감기가 길수록 핵은 천천히 붕괴된다.

방사성물질이 방사선을 내는 능력을 **방사능**이라고 부른다.(그림 7-19)

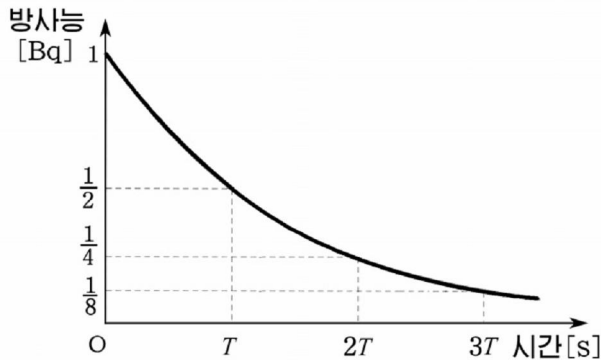



그림 7-19. 시간에 따르는 방사능의 변화

그림 7-20. 시간에 따르는 방사성물질의 량의 변화

방사능은 1s동안에 붕괴되는 원자핵의 수로 결정한다.

방사능의 단위는 1Bq (**베크렐**)이다. 1Bq 은 방사성물질에서 1s 동안에 붕괴되는 핵의 수가 하나일 때의 방사능의 크기와 같다. 즉

$$1\,\mathrm{Bq} = 1\mathrm{s}^{-1}$$

주어진 방사성물질의 량이 많을수록 그 물질의 방사능이 크며

시간이 지남에 따라 점차 작아진다.(그림 7-20)

이로부터 다음의 결론을 내릴수 있다.

모든 방사성물질들은 자기의 고유한 반감기를 가지는데 반감기가 지나면 물질의 량과 방사능이 절반으로 줄어든다. 이것을 **방사성붕괴법칙**이라고 부른다.

방사성붕괴법칙을 반감기 T로 표시하면 다음과 같다.

$$N = N_0\left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} \quad \text{방사성붕괴법칙}$$

방사성붕괴법칙을 리용하면 지구의 나이를 비롯하여 오랜 력사유물들과 시편들의 제작년도를 알아낼수 있다.

우리 나라의 원시조인 단군의 반만년의 력사도 이런 방법으로 확증하였다.

방사성계렬

? 방사성물질이 내는 방사선에는 왜 세개의 성분이 동시에 나타나는가.

한 방사성원자핵이 α붕괴(혹은 β붕괴)를 하면 변위규칙에 따라 새로 생긴 원자핵도 불안정한 방사성핵이 되므로 계속 붕괴되면서 방사선을 내며 이러한 붕괴는 안정한 동위원소핵이 될 때까지 계속된다.

방사성원소가 계속 붕괴되여 안정한 동위원소가 얻어질 때까지 변하는 과정을 나타내는 계렬을 **방사성계렬**이라고 부른다.

방사성계렬에는 4가지가 있다.

방사성계렬	출발원소	마감원소
우라니움계렬	$^{238}_{92}U$	$^{206}_{82}Pb$
토리움계렬	$^{232}_{90}Th$	$^{208}_{82}Pb$
악티니움계렬	$^{235}_{92}U$	$^{207}_{82}Pb$
넵투니움계렬	$^{241}_{94}Pu$	$^{209}_{83}Bi$

※ 여기서 넵투니움계렬은 인공적으로 얻은 초우라니움원소인 풀루토니움 $^{241}_{94}Pu$에서 시작되는 인공방사성계렬이다.

문제

1. 다음의 문장에서 옳은 문장을 찾아라.
   ㄱ) 방사성물질의 량이 줄어들수록 반감기와 방사능이 줄어든다.
   ㄴ) 방사성물질의 량이 줄어들수록 반감기는 줄어든다.
   ㄷ) 방사성물질의 량이 줄어들수록 방사능이 줄어든다.
   ㄹ) 방사성물질의 량이 줄어들어도 반감기는 변하지 않는다.
2. 방사성계렬에서 토리움계렬은 $^{232}_{90}\mathrm{Th}$ 에서 시작하여 $^{208}_{82}\mathrm{Pb}$ 에서 끝난다. 이 과정에 α 붕괴와 β 붕괴는 각각 몇번씩 있겠는가?
3. 방사성동위원소 $^{210}_{83}\mathrm{Bi}$ 는 β 붕괴하며 반감기가 5d이다. 현재 동위원소량의 16배이던 때는 며칠전이였겠는가?

제5절. 방사선의 리용

위대한 령도자 **김정일**대원수님께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《방사성동위원소와 방사선의 리용도 중요한 의의를 가지고있습니다.》

위대한 령도자 **김정일**대원수님의 유훈을 받들고 오늘 우리 나라에서는 공업과 농촌경리, 의학과 생물학 등 과학연구와 인민경제 여러 부문들에서 방사성동위원소와 방사선을 널리 리용하고있다.

방사성동위원소의 리용

방사선을 내는 동위원소를 **방사성동위원소**라고 부른다.

방사성동위원소에는 천연방사성동위원소와 함께 인공적으로 얻어내는 인공방사성동위원소가 있다. 현재 리용하고있는 방사성동위원소의 대부분은 핵반응결과에 거의 모든 원소들이 새로운 방사성동위원소를 낳는다는것을 리용하여 인공적으로 얻어낸 인공방사성동위원소들이다.

방사성동위원소는 보통의 화학원소와 화학적성질이 꼭같으며 다만 방사선을 내보내는 성질을 더 가진다. 그러므로 방사성동위원소는 방사선원천으로 널리 리용된다.

실례로 방사성동위원소는 제철공업에서 용광로, 평로들의 안벽에 붙인 내화물의 침식정도를 판정하는데 리용된다. 내화물을 쌓을 때 그속의 일정한 깊이에 방사선원천 $^{60}_{27}\mathrm{Co}$ 을 넣어준다. 그러면

내화물이 침식되면서 방사성물질이 용광로에서 용해되여나오는 쇠물과 함께 나오게 된다. 이때 용광로의 벽밖에서 방사능을 측정하거나 용해되여나오는 쇠물의 방사능을 측정하여 내화물의 침식정도를 판정할수 있다.

방사성동위원소는 또한 표식원자로 널리 쓰인다.

방사성동위원소는 매우 적게 섞여있어도 그 자리를 알수 있다. 이처럼 원소가 있는 자리를 알려주는 역할을 하는 원자를 **표식원자**라고 부른다.

표식원자는 생물학과 농업, 의학부문을 비롯한 과학기술분야에서 중요하게 쓰인다.

식물에서 영양물질을 이루는 개별적원소들이 어떻게 움직이며 사람이나 동물의 몸안에서 영양물질이 어떻게 흡수되는가 하는것을 표식원자를 쓰면 구체적으로 알아볼수 있다.

실례로 약간한 량의 방사성린 $^{32}_{15}\mathrm{P}$를 포함한 린비료를 식물에 주어 그것이 섭취한 $^{32}_{15}\mathrm{P}$를 따라가면서 알아보면 비료의 섭취정도와 식물체안에서 영양물의 이동속도를 알수 있다.

또한 종처에 요드가 많이 모이는 성질을 리용하여 방사성동위원소 $^{131}_{53}\mathrm{I}$가 들어있는 요드를 환자에게 먹이고 그 행처를 찾아보면 종처나 염증, 암부위와 같은 병상태를 확진할수 있다.(그림 7-21)

그림 7-21. 몸안에서의 방사성동위원소

방사선의 리용

방사선이 물질과의 호상작용에서 나타내는 특이한 성질들은 여러부문에 널리 리용된다.

우선 방사선이 물질을 뚫고 지나갈 때 방사선의 세기가 약해지는 성질을 리용하여 금속제품의 결함, 제품의 두께, 밀도, 액면의 높이 등을 측정한다.(그림 7-22) 실례로 γ선결함탐지법을 들수 있다.

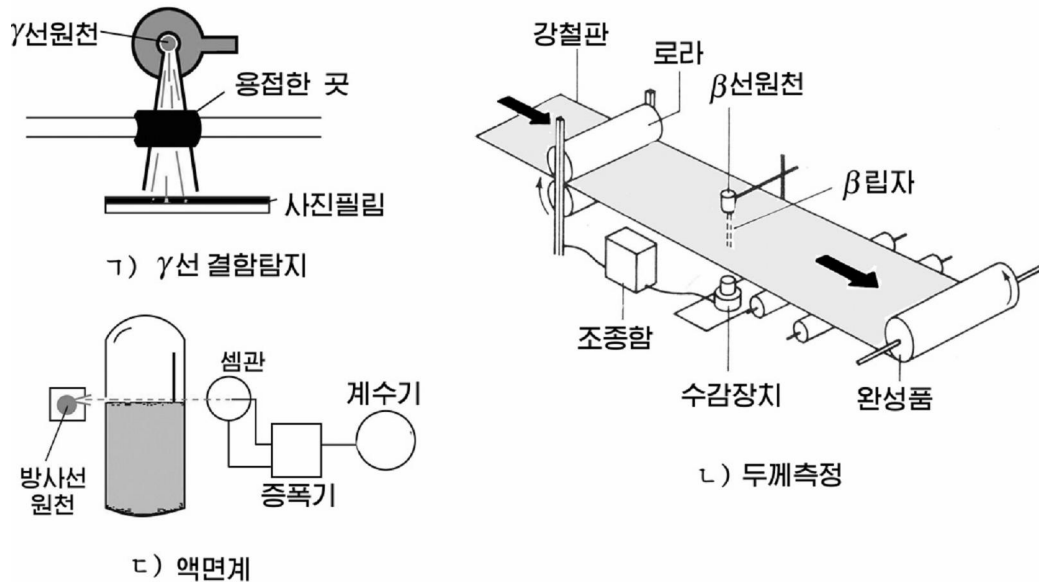



그림 7-22. 방사선의 리용

그림 7-22의 ㄱ에서와 같이 검사하려는 물체를 γ선원천과 사진필림사이에 놓고 적당한 시간 로출시킨 후 필림을 현상해보면 결함을 판정할수 있다. 검사하려는 물체의 내부에 결함(거품 또는 기타 불순물)이 있다면 이 부분을 통과하는 γ선의 세기는 다른데 비하여 더 세지므로 필림에는 결함과 같은 모양의 영상이 생기게 된다.

또한 방사선이 물질과 작용하면 그의 화학적 및 생물학적변화가 일어나는 성질을 생물학, 농학, 화학, 의학부문에서 많이 리용한다.

실례로 화학공업부문에서 높은 온도와 압력에서 실현되던 폴리에틸렌의 합성에 방사선을 쪼이면 보다 낮은 온도와 압력에서도 실현할수 있다.

농업부문에서 종자나 식물체에 방사선을 쪼이면 갑작변이를 일으켜 새 품종을 얻거나 성장속도와 수확고를 높일수 있다.

의학부문에서는 방사선으로 인체의 세포를 파괴하는 방법으로 종처나 암을 치료한다.

이처럼 방사선은 긍정적인 영향을 주는 반면에 인체에 작용하면 인체를 파괴하고 사람들의 수명을 줄이는 등 부정적인 영향도 주게 된다.

그림 7-23. 방사성표시

그러므로 방사선의 피해를 막기 위하여 방사성물질의 보관관리를 잘하여야 한다.(그림 7-23)

보통 방사성물질은 연통을 비롯한 보관함에 넣어서 보관하며 공업적으로는 방사성물질을 원격조종으로 다룬다. 방사성물질을 사람들이 직접 다룰 때에는 반드시 방사선이 몸에 닿지 않도록 하여야 한다.

방사성동위원소와 방사선은 과학과 기술이 발전함에 따라 그 리용범위가 더욱더 넓어질것이다.

문제

1. γ선의 원천인 $^{60}_{27}Co$를 용광로의 안벽에 설치하였는데 그것이 쇠물에 섞여나온다. 이것은 무엇을 의미하며 어떤 대책이 필요한가?
2. 표식원자로는 반드시 방사성동위원소만을 리용할수 있고 동위원소가 아닌 방사성원소는 리용할수 없다. 그 리유를 설명하여라.
3. 액면계의 그림 7-22의 ㄷ를 보고 액면계의 원리를 설명하여라. 련통관의 원리를 리용한 액면계보다 어떤 측면에서 좋은가?

第6절. 핵 반 응

화학반응에 의해서는 한 원자를 다른 원자로 변화시킬수 없다. 원자를 변화시키려면 원자핵을 변환시켜야 한다.

방사성붕괴는 불안정한 핵이 보다 안정한 다른 핵으로 변환되는 과정이다.

그러면 인공적으로 한 핵을 다른 핵으로 변환시킬수 없겠는가.

핵반응과정

핵자들사이의 결합력은 대단히 크며 핵력은 매우 가까운 거리에서만 작용하므로 원자핵을 쉽게 변환시킬수 없다. 그러나 원자핵도 양성자나 중성자와 같은 어떤 립자로 때리면 다른 핵으로 변환될수 있다.

이처럼 원자핵을 α립자나 양성자, 중성자와 같은 립자로 때려서 다른 원자핵으로 변환시키는것을 **핵반응**이라고 부른다.

핵반응은 두 단계를 거쳐 일어난다.

처음 α립자나 양성자, 중성자와 같은 립자가 핵에 부딪쳐 흡수되면서 불안정한 중간핵(복합핵)으로 려기된다. 이것이 핵반응의

1단계이다.(복합핵의 형성과정)

다음 복합핵은 불안정하므로 다른 립자를 내보내고 새로운 핵으로 붕괴된다.(복합핵의 붕괴과정) 이리하여 처음 핵이 새로운 핵으로 변하는 핵반응이 끝난다.

력사상 처음으로 실현된 핵반응은 양성자발견핵반응이다.

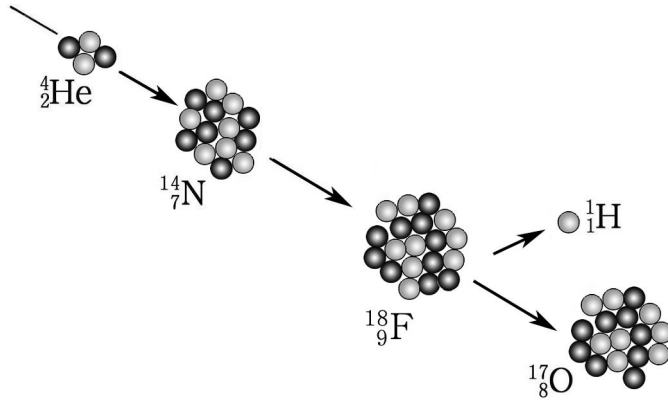
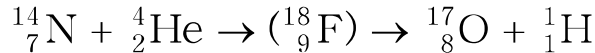



그림 7-24. 핵반응과정

α립자로 질소핵을 때리면 새로운 복합핵인 불소핵으로 려기되였다가 다시 양성자를 내보내면서 새로운 산소원자핵으로 변환된다.(그림 7-24)

$$^{14}_{7}N + {}^{4}_{2}He \rightarrow ({}^{18}_{9}F) \rightarrow {}^{17}_{8}O + {}^{1}_{1}H$$

핵반응에네르기

우의 핵반응에서 보는것처럼 핵반응과정에 전하수와 질량수가 보존된다. 그러나 반응전 원자핵들의 결합에네르기의 합과 반응후 원자핵들의 결합에네르기의 합은 같지 않다. 이처럼 핵반응전과 후의 결합에네르기차를 **핵반응에네르기**라고 부른다.

두 원자핵 A, B가 반응하여 새로운 두 원자핵 C, D가 생겼다고 하자.

그러면 핵반응에네르기는 $Q=(E_C+E_D)-(E_A+E_B)$로 된다.

아인슈타인의 공식에 의하면 핵반응전후의 질량결손에 해당한 에네르기가 곧 핵반응에네르기로 된다. 즉

$$Q=(E_C+E_D)-(E_A+E_B)=[(m_A+m_B)-(m_C+m_D)]c^2 \quad \text{핵반응에네르기}$$

핵반응과정에 나오는 에네르기를 고려해보면 핵반응에서 에네르기보존법칙이 성립한다는것을 알수 있다.(그림 7-25)

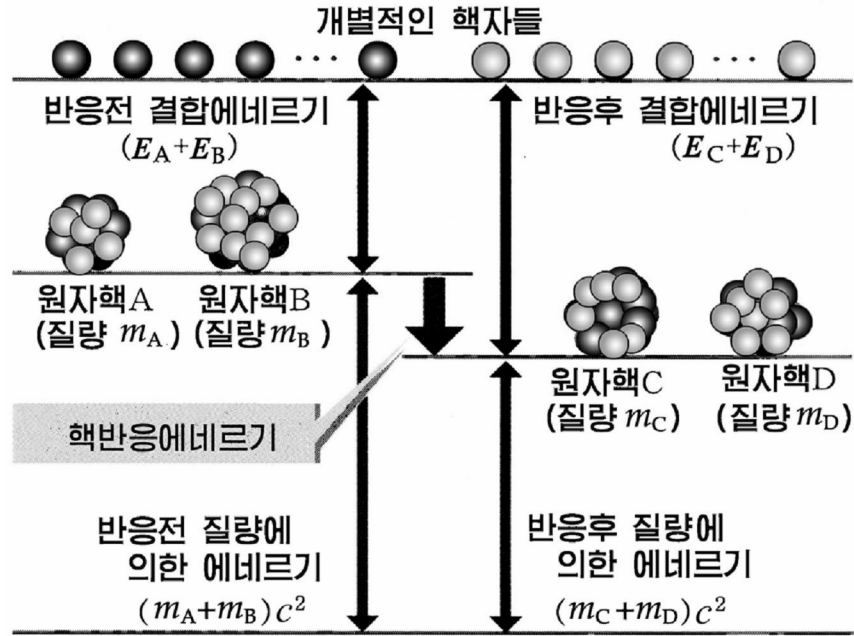



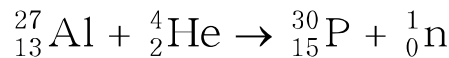
그림 7-25. 핵반응에네르기

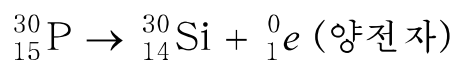
여러가지 핵반응실례

우선 새로운 립자를 발견하기 위한 핵반응을 들수 있다. 력사상 처음으로 실현된 핵반응은 양성자(수소핵)를 발견한 핵반응이다. 이 실험은 1919년에 라자포드가 진행하였다. 이 핵반응에서는 방사성원소에서 나오는 α 립자를 리용하였다.

새로운 립자를 발견한 핵반응의 다른 실례로서는 1932년에 영국물리학자 챠드위크가 진행한 핵반응을 들수 있다. 이 핵반응에서 처음으로 중성자가 발견되였다.

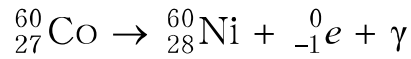
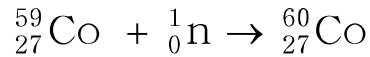
또한 1934년에 양전자를 발견한 핵반응은 다음과 같다.

$$^{27}_{13}\mathrm{Al} + ^{4}_{2}\mathrm{He} \rightarrow ^{30}_{15}\mathrm{P} + ^{1}_{0}\mathrm{n}$$

이 핵반응결과 자연계에는 없는 린의 동위원소 $^{30}_{15}\mathrm{P}$ 가 생겼다. 이 핵은 불안정한 방사성핵으로서 양전자를 복사하고 붕괴되여 규소의 안정한 동위원소 $^{30}_{14}\mathrm{Si}$ 로 전환된다. 붕괴식은 다음과 같다.

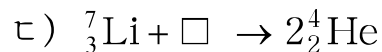
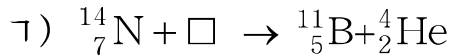
$$^{30}_{15}\mathrm{P} \rightarrow ^{30}_{14}\mathrm{Si} + ^{0}_{1}e \text{ (양전자)}$$

다음으로 인공방사성동위원소를 얻기 위한 핵반응을 들수 있다. 자연계에 있는 코발트의 동위원소는 $^{59}_{27}\mathrm{Co}$ 하나뿐이다. 안정한 이 핵에 중성자를 쏘아넣으면 질량수가 1만큼 더 큰 $^{60}_{27}\mathrm{Co}$ 핵으로

된다. 이 핵은 전자와 γ량자를 내보내고 니켈핵으로 붕괴된다.

$$^{59}_{27}\mathrm{Co} + ^{1}_{0}\mathrm{n} \rightarrow ^{60}_{27}\mathrm{Co}$$

$$^{60}_{27}\mathrm{Co} \rightarrow ^{60}_{28}\mathrm{Ni} + ^{0}_{-1}e + \gamma$$

$^{60}_{27}\mathrm{Co}$의 반감기는 5.2a이므로 려기상태에 오래동안 있게 되여 γ선이나 β선을 내보내는 방사선원천으로 널리 쓰이고있다.

문제

1. 방사성붕괴에 의해서도 핵변환이 일어나고 핵반응에 의해서도 핵변환이 일어난다. 어떤 차이가 있는가?
2. 다음의 핵반응식을 완성하여라.
   ㄱ) $^{14}_{7}\mathrm{N} + \square \rightarrow ^{11}_{5}\mathrm{B} + ^{4}_{2}\mathrm{He}$
   ㄴ) $^{27}_{13}\mathrm{Al} + \square \rightarrow ^{30}_{15}\mathrm{P} + ^{1}_{0}\mathrm{n}$
   ㄷ) $^{7}_{3}\mathrm{Li} + \square \rightarrow 2^{4}_{2}\mathrm{He}$
3. 정지하고있던 원자핵 $^{6}_{3}\mathrm{Li}$에 에네르기가 작은 중성자 $^{1}_{0}\mathrm{n}$을 충돌시켜 헬리움원자핵과 초중수소핵을 얻었다. 핵반응식을 쓰고 반응에서 나오는 에네르기를 구하여라. $^{6}_{3}\mathrm{Li}$의 질량은 6.015 13D, $^{1}_{0}\mathrm{n}$의 질량은 1.008 67D, $^{4}_{2}\mathrm{He}$의 질량은 4.002 6D, $^{3}_{1}\mathrm{He}$의 질량은 3.016D이다.

핵반응의 구분

핵반응은 사명과 타격하는 립자에 따라 다음과 같이 구분한다.

핵반응의 사명에 따라

① 새로운 립자를 발견하기 위한 핵반응
② 방사성동위원소를 얻기 위한 핵반응
③ 많은 에네르기를 얻기 위한 핵반응
  ○ 가벼운 핵의 융합반응
  ○ 무거운 핵의 분렬반응

핵을 타격하는 립자에 따라

① α립자에 의한 핵반응
② 중성자에 의한 핵반응
③ 양성자에 의한 핵반응
④ 중수소핵에 의한 핵반응

제7절. 핵분렬반응

인민경제의 여러 부문에서 늘어나는 동력에 대한 수요를 원만히 보장하려면 원자력을 비롯한 여러가지 새로운 동력자원에 의거하여야 한다.

무거운 핵의 분렬

1938년에 느린 중성자로 우라니움 $^{235}_{92}U$를 타격할 때 우라니움핵이 두쪼각으로 갈라지며 2∼3개의 중성자가 나온다는것이 알려졌다.

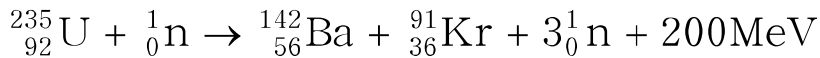
이처럼 무거운 원자핵이 서로 비슷한 질량수를 가진 두개의 원자핵으로 갈라지는 핵반응을 **핵분렬반응**이라고 부른다.

핵분렬반응에서는 많은 에네르기를 내보낸다.

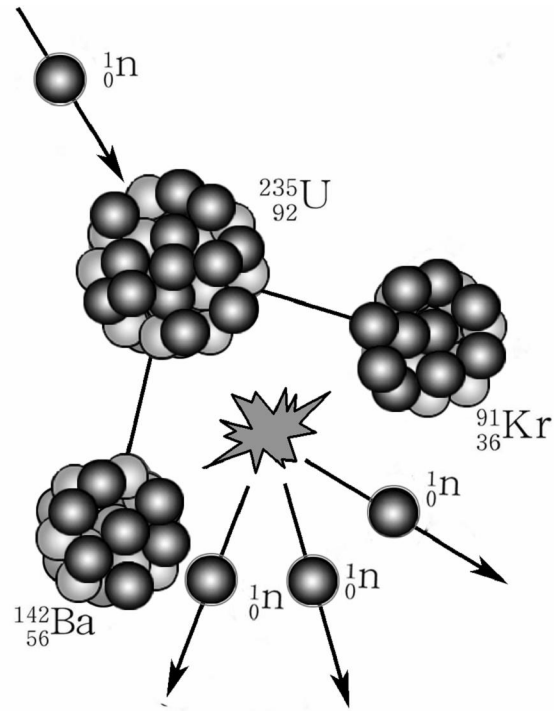
실례로 우라니움 $^{235}_{92}U$핵을 중성자로 타격하면 바리움과 크립톤핵으로 갈라지면서 2∼3개의 중성자와 약 200MeV의 에네르기가 나온다.(그림 7-26)

그림 7-26. 우라니움의 핵분렬반응

핵반응식은 다음과 같다.

$$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{142}_{56}Ba + ^{91}_{36}Kr + 3^{1}_{0}n + 200MeV$$

이때 나오는 에네르기는 우라니움핵이 보다 더 안정한 핵으로 되면서 내보내는 에네르기이다.

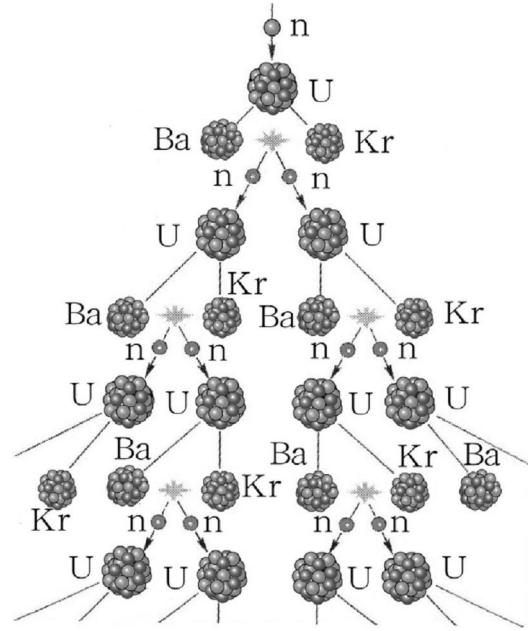
핵분렬이 일어날 때 몇개의 중성자가 나오는것은 다음과 같이 설명된다.

무거운 핵은 양성자들사이의 전기적밀힘을 줄이기 위해 가벼운 핵보다 상대적으로 양성자보다 중성자를 더 많이 가지고있다. 그러므로 핵이 갈라져 가벼운 핵들로 되면 몇개의 중성자가 남게 된다. 그러므로 핵분렬할 때 중성자가 밖으로 나오게 된다.

핵분렬련쇄반응

핵분렬때 나오는 에네르기를 동력으로 쓰려면 많은 핵들을 련달아 분렬시켜야 한다.

실례로 한개 우라니움핵이 분렬될 때 나오는 2~3개의 중성자로 다른 우라니움핵을 때리면 그 핵이 분렬되면서 역시 2～3개의 중성자가 나온다. 이 중성자는 또 다른 우라니움원자핵을 분렬시킨다.(그림 7-27)

그림 7-27. 핵분렬련쇄반응

이처럼 핵이 분렬될 때 나오는 중성자가 다른 핵을 분렬시키고 그때 나오는 중성자가 또 다른 핵을 분렬시키는 방법으로 핵분렬이 사태처럼 련달아 일어나는 핵반응을 **핵분렬련쇄반응**이라고 부른다.

❓ 핵분렬련쇄반응을 일으키려면 어떻게 해야 하는가.

천연우라니움에는 $^{235}_{92}$U가 0.71％로 적게 들어있고 $^{238}_{92}$U이 99.29％로 많이 들어있다. 그런데 $^{238}_{92}$U 는 핵분렬때 나오는 빠른 중성자를 세게 흡수하여 다른 핵으로 전환될뿐 핵분렬을 일으키지 않으므로 핵분렬련쇄반응의 장애로 된다. 오직 $^{235}_{92}$U만이 핵분렬에 참가하므로 천연우라니움을 그대로 쓰지 않고 $^{235}_{92}$U의 비률을 높여서 써야 한다. 이처럼 천연우라니움에서 $^{235}_{92}$U의 비률을 높이는것을 **우라니움농축**이라고 부른다.

우라니움 $^{235}_{92}$U 핵이 분렬될 때 생기는 중성자들은 $^{235}_{92}$U덩어리가 너무 작으면 다른 $^{235}_{92}$U 와 부딪치지 못하고 밖으로 나가버리며 또는 $^{238}_{92}$U에 흡수되기도 한다. 그러므로 핵분렬련쇄반응이 일어나자면 핵분렬물질의 순도가 높아야 하는것과 함께 그 질량이 일정한 값보다 더 커야 한다.

이처럼 핵분렬련쇄반응을 일으키는데 필요한 최소한의 질량을 **림계질량**이라고 부른다.

림계질량은 핵분렬물질에 따라 다르다.

이밖에도 $^{235}_{92}$U가 느린 중성자에 의하여 분렬이 아주 잘 일어나므로 핵분렬될 때 생기는 빠른 중성자를 열운동속도정도의 느린 중성자로 감속시킬수도 있다.

중성자의 속도를 감속시키는 물질을 **감속재**라고 부른다.

※ 열운동속도정도의 느린 속도를 가진 중성자를 **열중성자**라고 부르기도 한다.

※ 고농축우라니움을 쓸 때에는 중성자를 감속시키지 않아도 $^{235}_{92}$U는 잘 분렬된다.

순수한 $^{235}_{92}$U의 1kg속에 들어있는 핵이 모두 분렬될 때 8×10^{13}J의 에네르기가 나오며 이 에네르기는 약 4 000t의 석탄이 탈 때 나오는 에네르기와 맞먹는다.

원자력의 리용

원자로. 핵분렬련쇄반응때 나오는 에네르기를 인민경제의 동력으로 리용하려면 련쇄반응속도를 조절하여야 한다.

련쇄반응속도를 조절할수 있도록 만든 설비를 **원자로**라고 부른다.

핵분렬련쇄반응속도를 조절하자면 련쇄반응때 생겨나는 중성자의 일부를 없애버려 단위시간동안에 분렬되는 핵의 수를 조절하여야 한다. 그러므로 원자로안에는 중성자를 흡수하여 련쇄반응속도를 조절하는 조종봉(중성자흡수물질)이 들어있다.

원자로의 구조를 그림 7-28에 보여주었다.

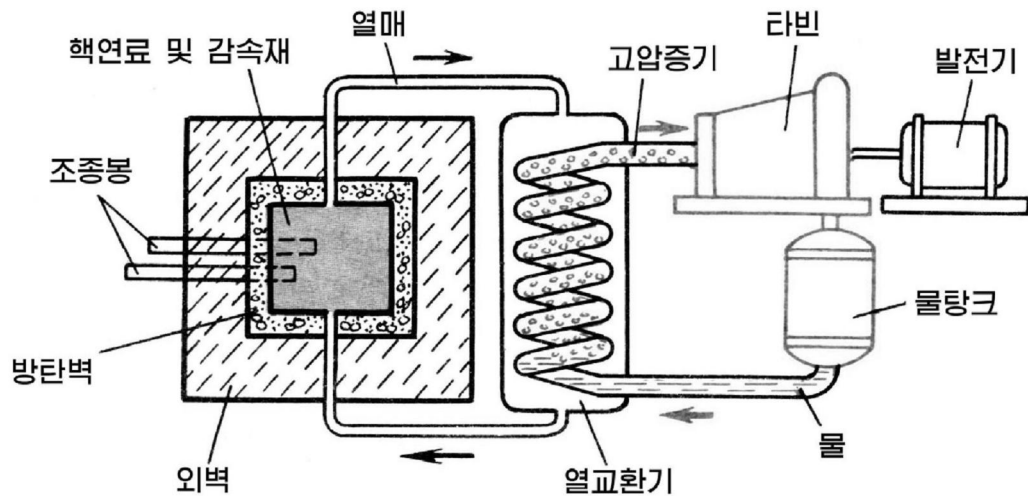



그림 7-28. 원자로의 구조

이 원자로에는 핵연료인 우라니움봉이 일정한 규칙에 따라 배치되여있고 그 둘레에 중성자를 감속시키기 위한 감속재를 넣었다.

그리고 중성자를 잘 흡수하는 물질로 만든 조종봉을 설치하였다. 중성자가 밖으로 나오는것을 막기 위하여 중성자반사물질과 방사선을 막는 연층, 두터운 콩크리트층으로 핵반응구역둘레를 막았다.

만일 중성자가 갑자기 많아지면 핵분렬련쇄반응속도가 빨라져서 사고를 일으킬수 있으므로 중성자가 너무 많이 생기면 조종봉을 깊숙이 넣어 중성자를 없앤다.

원자로에서는 이 모든 과정이 콤퓨터에 의하여 원격조종되고있다.

핵이 분렬될 때 나오는 에네르기를 랭각체계에 따라 순환시키면서 고압증기를 얻어 타빈을 돌린다.

느린 중성자원자로에서는 핵연료로 천연우라니움이나 저농축우라니움, 플루토니움을 쓸수 있으며 조종봉으로는 붕소나 카드미움막대기를 쓴다. 또한 이 원자로는 감속재에 따라 흑연감속로, 경수로, 중수로, 베릴리움감속로 등으로 나눈다.

※ 순수한 보통 물 H_2O를 **경수**, 중수소핵과 산소핵으로 이루어진 무거운 물 D_2O를 **중수**라고 부른다.

오늘 원자로는 원자력발전소, 쇄빙선, 무역선, 잠수함, 항공모함 등의 동력으로 광범히 리용되고있다.(그림 7-29) 또한 원자로에서 방사선동위원소를 얻어내여 인민경제 여러 분야에 널리 리용하고있다.

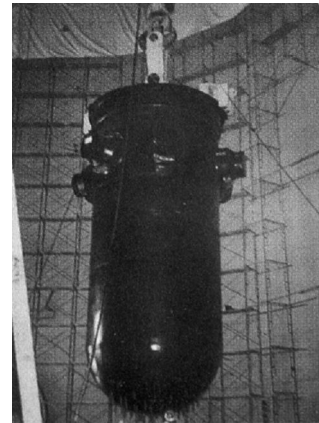



그림 7-29. 원자로

원자탄. 핵분렬련쇄반응은 1μs사이에 일어나며 짧은 시간사이에 방대한 에네르기가 나온다.

핵분렬련쇄반응때 나오는 에네르기를 리용하여 만든 폭탄을 **원자탄**이라고 부른다.(그림 7-30)

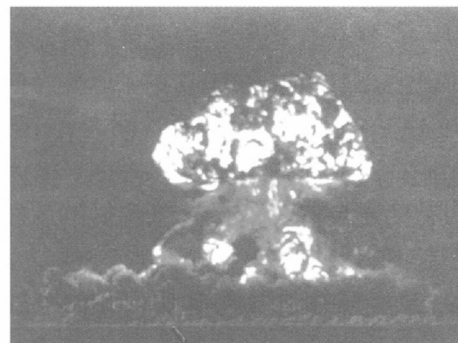
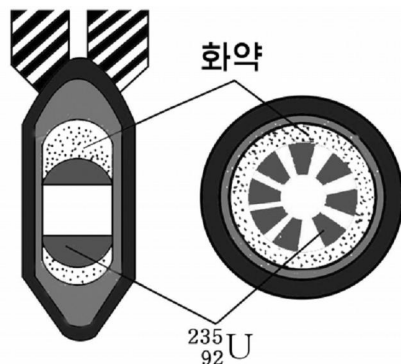



그림 7-30. 원자탄의 구조와 폭발

원자탄속에는 순도가 높은 고농축우라니움이 림계질량보다 작게 여러 쪼각으로 나뉘여 들어있다. 우라니움을 둘러싸고있는 화약을 폭발시켜 우라니움쪼각들을 합쳐놓으면 덩어리의 질량이 림계질량을 넘게 되여 핵분렬련쇄반응이 일어난다.

과학이 발전하면서 고농축우라니움을 리용한 원자탄과 이밖에 풀루토니움을 비롯한 방사성원자핵을 리용한 원자탄들이 나오고 있으며 그 크기도 훨씬 작아지고있다.

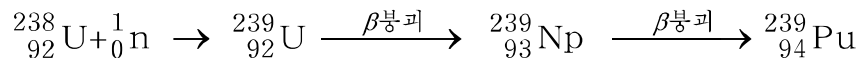
생각하기 우라니움 ${}^{235}_{92}U$ 1kg이 분렬될 때 나오는 에네르기는 얼마인가?

문제

1. 원자로와 원자탄의 구조와 원리에서 차이는 무엇인가?
2. 하루에 220g의 우라니움 ${}^{235}_{92}U$을 소비하는 원자력발전소의 출력은 얼마인가? 발전소의 효률은 25%이다.
3. 우라니움핵이 분렬되는 핵반응에서 ${}^{235}_{92}U$핵 1개가 중성자에 의해 분렬될 때 방출되는 에네르기를 계산하여라. ${}^{235}_{92}U$, ${}^{142}_{56}Ba$, ${}^{91}_{36}Kr$의 질량은 각각 235.043 9D, 141.913 9D, 90.897 3D이다.

핵 연 료

천연우라니움속에 있는 동위원소들가운데서 99.27%를 차지하는 ${}^{238}_{92}U$은 핵반응과정에 중성자를 포획하여 ${}^{239}_{92}U$로 전환된다. ${}^{239}_{92}U$는 두번 β붕괴하여 ${}^{239}_{94}Pu$로 된다. 즉

$${}^{238}_{92}U+{}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{239}_{92}U \xrightarrow{\beta\text{붕괴}} {}^{239}_{93}Np \xrightarrow{\beta\text{붕괴}} {}^{239}_{94}Pu$$

이때 생기는 ${}^{239}_{94}Pu$도 ${}^{235}_{92}U$와 꼭같이 중성자에 의하여 핵분렬을 일으키는 좋은 핵연료이다. 또한 ${}^{232}_{90}Th$도 중성자를 흡수하고 두번 β붕괴하면 ${}^{233}_{92}U$이 얻어지는데 이것 역시 핵연료이다.

그러므로 원자핵분렬과정에 많은 에네르기뿐아니라 좋은 핵연료도 얻을수 있다.

제8절. 핵융합반응

태양이나 별들은 무엇으로 이루어졌기에 그처럼 거대한 에네르기를 내보내겠는가.

가벼운 핵의 융합

많은 에네르기가 나오는 핵반응에는 무거운 원자핵의 분렬반응과 함께 가벼운 원자핵들의 융합반응도 있다. 가벼운 핵들이 결합되여 보다 안정한 핵으로 될 때에는 핵분렬때보다 더 큰 에네르기가 나온다.

이와 같이 가벼운 원자핵들이 융합되여 다른 핵으로 넘어가는 핵반응을 **핵융합반응**이라고 부르고 이때 나오는 에네르기를 **핵융합에네르기**라고 부른다.

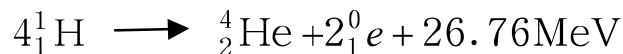
핵을 융합시키자면 그것들을 핵력의 작용범위까지 접근시켜야 한다. 그런데 핵은 +전기를 띠고있으므로 그들사이에는 전기적밀힘이 작용한다. 이 밀힘을 극복하고 핵을 융합시키기 위하여서는 수백만K이상의 높은 온도로 가열해야 한다. 이때 큰 열운동에네르기를 가진 핵들이 충돌하면서 핵융합이 실현된다.

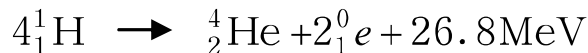
이런 의미에서 핵융합반응을 **열핵반응**이라고도 부른다.

태양이 내보내는 거대한 에네르기는 바로 핵융합에네르기이다. 실제로 태양내부의 온도는 1 600만K정도로서 대단히 높으며 태양을 구성하는 물질에서 70%정도가 수소이고 20%정도가 헬리움이므로 태양에서는 핵융합반응이 일어날 조건이 충분하다는것을 알수 있다.

태양에서는 두가지 계렬의 핵융합반응에 의해 에네르기가 나온다.

첫째 계렬은 수소가 헬리움으로 넘어가는 과정인데 식을 쓰면 다음과 같다.

$$4{}_1^1\mathrm{H} \longrightarrow {}_2^4\mathrm{He} + 2{}_1^0e + 26.76\mathrm{MeV}$$

둘째 계렬은 수소가 탄소의 도움으로 헬리움으로 넘어가는 과정인데 반응식들을 종합하면 다음과 같다.

$$4{}_1^1\mathrm{H} \longrightarrow {}_2^4\mathrm{He} + 2{}_1^0e + 26.8\mathrm{MeV}$$

태양은 이와 같은 핵융합반응들에 의해 한해에 1.55×10^{31}kJ 정도의 방대한 에네르기를 내보내며 그가운데서 22억분의 1정도를

지구가 받는다.

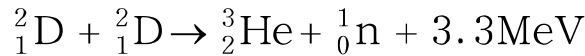
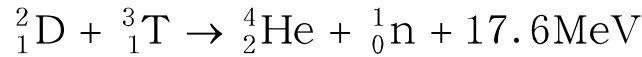
이 에네르기를 질량으로 환산하면 태양은 매해 1.7×10^{17}kg의 질량을 잃어버리는것으로 되는데 이것은 태양의 전체 질량에 비하면 10조분의 1도 안된다. 그러므로 태양의 에네르기원천은 실제적으로 무진장하다고 볼수 있다.

조종핵융합반응

핵융합으로 동력을 얻으려면 핵융합반응을 조종하여야 한다.

지구상에서 실현하기가 유리한 핵융합반응은 중수소($_1^2D$)와 초중수소($_1^3T$), 중수소($_1^2D$)와 중수소($_1^2D$)의 융합반응이다. 즉

$$_1^2D + {}_1^3T \rightarrow {}_2^4He + {}_0^1n + 17.6MeV$$

$$_1^2D + {}_1^2D \rightarrow {}_2^3He + {}_0^1n + 3.3MeV$$

이 열핵반응들은 상대적으로 낮은 온도조건에서 실현된다.

인공적으로 열핵반응을 실현하려면 $10^7 \sim 10^8$K 정도의 매우 높은 온도를 얻어야 하며 $10^{14}cm^{-3}$의 밀도로 원자핵들이 집중되여있는 상태가 1s이상 유지되여야 한다.

이것은 전자기가두기식핵융합방법(또까마크)과 레이자에 의한 관성핵융합방법으로 해결하고있다.

전자기가두기식핵융합방법에서는 고온상태의 핵융합연료를 자기마당으로 세게 압축하여 높은 온도와 초고밀도상태를 보장하여 핵융합반응을 실현한다.(그림 7-31)

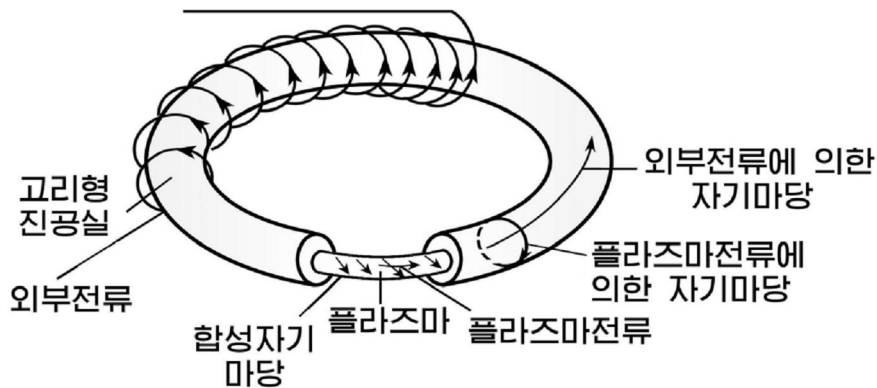



그림 7-31. 전자기가두기식핵융합방법

관성핵융합방법에서는 중수소와 초중수소의 고체혼합물을 구모양으로 만들어놓고 강력한 레이자빛을 쪼여 순간적으로 초고밀도와

높은 온도를 보장함으로써 핵융합반응을 실현한다.

핵분렬반응과는 달리 핵융합반응은 원료자원의 제한이 없고 방사능을 가진 페기물에 의한 생태환경파괴가 없는것으로 하여 오늘의 화석연료를 대신할 가장 전망성있는 미래의 동력으로 주목되고있다.

우리 나라에서는 당의 현명한 령도밑에 최첨단과학기술의 면모를 과시하는 핵융합반응을 성공시키는 자랑찬 성과를 이룩하였다. 우리의 과학자들은 현재 발전되였다고 하는 몇개 나라에서만 시도하고있는 이 기술을 100% 자체의 힘으로 해결함으로써 우리 식의 독특한 열핵반응장치를 설계제작하고 열핵반응과 관련한 기초연구를 끝냈다. 그리하여 새 에네르기개발을 위한 돌파구가 확고하게 열리였으며 나라의 최첨단과학기술발전에서 새로운 경지가 개척되였다.

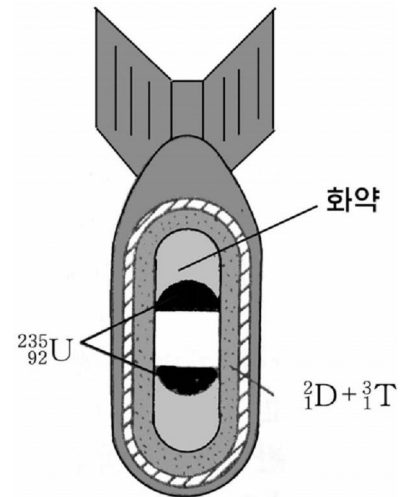
수소탄과 중성자탄

핵융합반응에서 생기는 에네르기를 리용하여 만든 폭탄을 **수소탄**이라고 부른다.(그림 7-32)

그림 7-32. 수소탄의 구조

같은 크기의 원자탄에 비해 수소탄은 100배의 에네르기를 낸다.

수소탄의 충격파와 열 및 빛복사에 의한 피해보다도 중성자에 의한 피해가 더 크도록 만든 소형수소탄을 **중성자탄**이라고 부른다.

중성자탄은 건물과 대상물에 대한 타격은 극히 적고 생명체에 대한 피해가 크다. 그러나 중성자탄이 폭발할 때 나오는 중성자들은 지층 1.5m정도이면 능히 막을수 있으므로 방어대책도 인차 할수 있다.

문제

1. 조종핵융합반응과 핵융합반응이 다른 점은 무엇인가?
2. 수소탄안에 있는 원자탄은 어떤 역할을 하는가?
3. 중수소핵과 초중수소핵이 융합될 때 나오는 에네르기는 얼마인가? 중수소핵의 질량은 $m_{\mathrm{D}}=2.0141\mathrm{D}$이고 초중수소핵의 질량은 $m_{\mathrm{T}}=3.016\mathrm{D}$이다.

제9절. 소 립 자

소 립 자

인류는 오래전부터 물질이 무엇으로 이루어졌는가를 밝히려고 꾸준히 노력하여왔다.

그리하여 물질은 원자로 이루어졌으며 원자는 전자와 핵으로, 핵은 양성자와 중성자로 이루어졌다는것을 밝혀냈다.

그렇다면 양성자와 중성자는 더는 쪼갤수 없는 립자이겠는가.

1960년대에 와서 양성자와 중성자들도 더 작은 알갱이(쿼크)들로 구성되여있다는것을 밝혀내게 되였다.(그림 7-33)

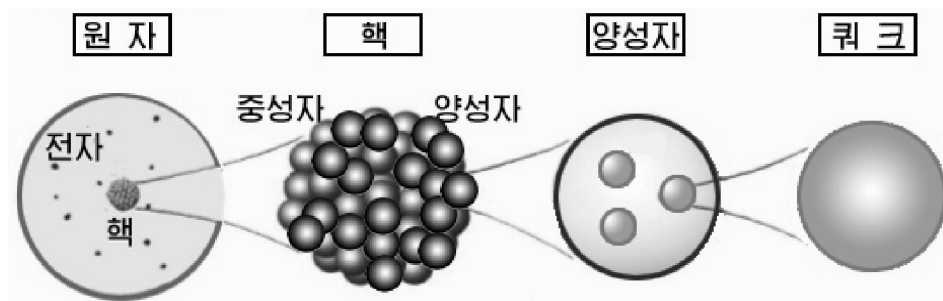



그림 7-33. 소립자

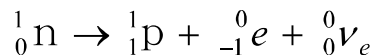
이처럼 물질을 구성하고있는 가장 작은 알갱이들을 **소립자**라고 부른다.

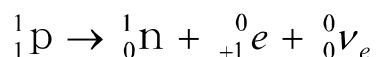
소립자들의 특성

소립자들에 대한 연구가 활발해지면서 숨겨져있던 소립자들의 특성이 점차적으로 밝혀지기 시작하였다. 소립자들이 일반적으로 가지는 몇가지 특성을 보자.

우선 소립자들은 자기의 고유한 수명을 가지고 다른 립자들로 전환된다는것이다.

실례로 중성자는 원자핵밖으로 나가면서 15min의 수명을 가지고 양성자와 전자, 뉴트리노(전자뉴트리노 ν_e)로 붕괴된다.

$$ {}_0^1\mathrm{n} \rightarrow {}_1^1\mathrm{p} + {}_{-1}^{0}e + {}_0^0\nu_e $$

양성자도 핵안에서 중성자와 양전자, 뉴트리노로 전환되는 경우가 있다.

$$ {}_1^1\mathrm{p} \rightarrow {}_0^1\mathrm{n} + {}_{+1}^{0}e + {}_0^0\nu_e $$

이처럼 소립자들에는 전자와 양성자처럼 안정하며 중성자와 같이 수명이 긴 소립자들이 있는가 하면 중간질량을 가진 립자들처럼 수명이 10^{-6}s정도인 소립자들도 있으며 지어 수명이 10^{-24}s이하인

소립자들도 있다.

수명이 10^{-24}s이하인 소립자를 **공명립자**라고 부른다.

다음으로 소립자의 특성은 거의 모든 소립자에 반립자가 있다는것이다.

어떤 소립자와 질량, 수명, 전기량의 크기는 같은데 전기량의 부호가 반대인 립자를 그 소립자의 **반립자**라고 부른다.

실례로 1932년에 전자의 반립자인 양전자가 발견되였으며 1955년에 반양성자가 발견되였다. 1960년대에 거의 모든 소립자에 대하여 반립자들이 발견되였다.

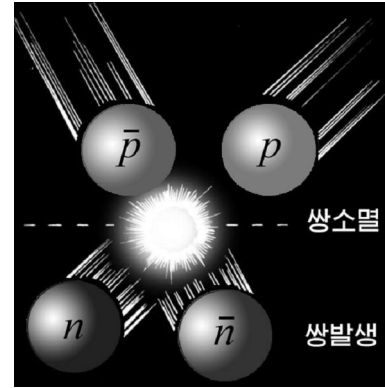



그림 7-34. 쌍소멸, 쌍발생

또한 소립자의 특성은 쌍소멸, 쌍발생이다.(그림 7-34)

소립자들이 소멸될 때 반드시 립자와 반립자가 충돌하여 없어지며 발생될 때에도 립자와 반립자들이 쌍으로 생겨나는 물리적현상을 **쌍발생**, **쌍소멸**이라고 부른다.

실례로 양전자와 전자가 만나면 동시에 소멸되고 γ립자를 발생시킨다.

소립자의 중요한 특성은 그것들이 호상작용할 때 에네르기, 운동량, 각운동량 등이 보존되며 나아가서 소립자들을 특징짓는 다른 몇가지 고유한 특성량들이 보존된다는것이다. 실례로 소립자들은 서로 전환되거나 쌍발생, 쌍소멸되여도 전체 전기량은 변하지 않는다.

소립자들의 호상작용

소립자들은 서로 결합되여 원자핵이나 원자, 분자들을 이루며 서로 충돌하여 다른 립자로 전환되기도 한다.

소립자들사이에 작용하는 힘들을 크게 나누어보면 전자기적호상작용, 강한 호상작용, 약한 호상작용, 중력(만유인력)호상작용의 4가지로 볼수 있다.

전자기적호상작용. 대전립자들사이에 작용하는 힘으로서 그 세기가 강한 호상작용의 1/100배정도이다.

이 힘은 원자안의 핵과 전자를 결합시키는데서 결정적역할을 하는 힘이다.

강한 호상작용. 아주 가까운 거리(10^{-15}m)에서 나타나는 매우 센 힘

이다. 이 힘은 핵자들을 결합시키는 핵력의 원천이다. 즉 핵자들사이에 작용하는 핵력은 강한 호상작용이다. 실례로 쿼크들은 강한 호상작용에 의하여 소립자(하드론)를 이룬다.

약한 호상작용. 극히 가까운 거리(10^{-17}m)에서 나타나며 강한 호상작용의 10^{-14}배정도로서 전기힘보다는 매우 작고 중력보다는 대단히 크다. 이 힘은 소립자들이 스스로 붕괴될 때 나타난다.

실례로 β붕괴를 일으키는 힘은 핵자들사이에 작용하는 약한 호상작용의 결과이다.

중력호상작용. 자연에 존재하는 힘들가운데서 가장 약하며 강한 호상작용의 10^{-38}배밖에 안된다.

중력호상작용은 먼거리에서도 작용하며 언제나 끌힘이다.

호상작용힘이 매우 약하지만 질량이 커질수록 커지므로 우주적 규모에서 볼 때에는 기본힘으로 되고있다.

자연계에 존재하는 4가지 힘들의 상대세기, 작용거리와 호상작용하는 립자들을 다음표에 주었다.

힘의 종류	상대세기	작용거리	호상작용하는 립자들
강한 호상작용	1	짧은 거리(약 10^{-15}m)	하드론
전자기적호상작용	10^{-2}	거꿀두제곱(무한대)	대전립자
약한 호상작용	10^{-14}	극히 짧은 거리(약 10^{-17}m)	모든 립자
중력호상작용	10^{-38}	거꿀두제곱(무한대)	모든 립자

소립자의 분류와 응용

지금까지 알려진 소립자의 종류는 물질을 이루는 원소들의 수보다 더 많다. 현재까지 발견된 소립자들은 공명립자들까지 포함하여 그 수가 300여개에 달한다.

소립자들은 흔히 그 질량과 호상작용의 형태에 따라 빛량자, 약한 호상작용을 하는 립자들인 렙톤(가벼운 소립자), 강한 호상작용을 하는 립자들인 하드론으로 가르며 하드론은 다시 메존(중간질량을 가진 소립자)과 바리온(무거운 소립자)으로 분류한다.

소립자들에 대한 연구는 소립자의 넓은 응용분야를 열어놓고있다.

원자핵에서 한개 핵자의 에네르기는 MeV정도이지만 소립자의

에네르기는 GeV정도로서 핵에네르기의 1 000배정도이다. 소립자에 대하여 깊이 파악하게 되면 핵에네르기보다 1 000배나 더 큰 새로운 소립자에네르기를 얻을수 있을것이다. 지금 중성자묶음을 리용한 중성자사진법이 개발되여 물질구조연구와 원유탐사에 널리 리용되고있다.

또한 양성자묶음은 물질의 물리화학적성질을 연구하는데서 힘있는 수단으로 쓰이며 특히 상온핵융합반응의 촉매로 쓰이고있다. 뉴트리노묶음은 우주연구에서 기본수단의 하나이며 이온묶음은 핵려파기를 만드는데 쓰이고있다.

그러나 소립자에 대한 연구는 아직 초보에 불과하며 수많은 미지의 문제들을 안고있다.

문제

1. 원자핵안에서 중성자는 양성자로 잘 전환되지만 양성자는 중성자로 잘 전환되지 않는다. 왜 그런가?
2. 전자와 양전자가 충돌하면 《소멸》되고 2개의 γ 량자가 생긴다. 《소멸》되기 전까지의 립자들의 운동에네르기를 무시할 때 γ 량자의 파장을 구하여라.

참고 쿼크모형

소립자가 물질을 이루는 가장 작은 구성요소로 된다면 지금까지 알려진 모든 소립자들이 다 물질을 이루는 기본소립자로 되는가.

말그대로 소립자는 물질을 이루는 가장 근본적인 립자로서 소립자들도 어떤 근본적인 몇가지 립자들로 이루어지지 않았겠는가 하는 생각을 하게 되였다.

그리하여 소립자들의 구조모형이 제기되였으며 그중의 하나가 쿼크모형이다.

이에 의하면 전기량이 $e/3$ 혹은 $2e/3$인 쿼크라는 립자가 6개 있으며 이것들과 그의 반립자들이 결합되여 하드론이라는 소립자들을 구성하며 렙톤은 쿼크와 같은 근본적인 소립자로 된다는것이다.

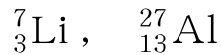
쿼크들은 서로 매우 굳게 결합되여있으며 그것들이 자유로운 상태로는 존재하지 않으므로 전기소량의 분수값은 관측할수 없는것이다. 그러나 쿼크의 존재는 실험에 의하여 확인되였다.

복습문제(1)

1. 어떤 원소의 원자들은 질량이 서로 다른것이 있다. 이것들은 물리적성질이 서로 다르지만 화학적성질이 같다. 왜 그런가?

2. 자연계에 있는 동은 $^{63}_{29}Cu$ 와 $^{65}_{29}Cu$ 의 두가지 동위원소의 화합물인데 그의 원자량은 63.6이다. 동의 동위원소들의 혼합비를 구하여라. (**답.** 7:3)

3. 다음 원자핵들의 결합에네르기를 계산하고 어느 핵이 더 안정한 핵인가를 밝혀라. 이 핵들의 질량은 각각 7.014 35D, 26.974 38D이다.

$$^{7}_{3}Li, \quad ^{27}_{13}Al$$

(**답.** 39.27MeV, 225MeV, $^{27}_{13}Al$)

4. 온도가 방사성핵의 붕괴속도에 영향을 주는가?

5. 방사성핵 $^{90}_{38}Sr$ 의 반감기는 T=20a이다. 10a, 20a 후에 각각 붕괴되지 않은 핵의 수는 처음핵의 몇 %나 되겠는가?

(**답.** 70.7%, 50%)

6. 어떤 방사성물질의 량이 8h동안에 처음량의 1/3로 감소하였다. 24h동안에는 처음량의 몇분의 1로 되겠는가?

(**답.** 1/27)

7. 어떤 유적의 한 나무제품에 포함된 $^{14}_{6}C$ 의 비률을 재였더니 그것은 살아있는 식물체속에 포함된 $^{14}_{6}C$ 의 70.7%였다. 이 나무제품은 언제 만들어졌는가? 여기서 $^{14}_{6}C$의 반감기는 5.73×10^{3}a 이다. (**답.** 2 865년 전)

8. 우라니움 $^{235}_{92}U$ 는 7번의 α 붕괴와 4번의 β 붕괴를 거친 다음 어떤 핵으로 되겠는가? (**답.** $^{207}_{82}Pb$)

9. 싸이클로트론속에는 B=1.5T인 고른자기마당이 형성된다. 싸이클로트론전극의 직경이 60cm일 때 α 립자, 양성자를 얼마의 에네르기까지 가속시킬수 있는가?

(**답.** 9.75MeV, 9.69MeV)

10. 다음의 핵반응식을 완성하여라.

ㄱ) $^{27}_{13}Al+^{1}_{0}n \rightarrow \square + ^{4}_{2}He$　　ㄴ) $^{12}_{6}C+^{1}_{1}H \rightarrow ^{13}_{6}C + \square$

ㄷ) $\square+^{1}_{1}H \rightarrow ^{22}_{11}Na+^{4}_{2}He$　　ㄹ) $^{55}_{25}Mn+\square \rightarrow ^{55}_{26}Fe+^{1}_{0}n$

11. 베릴리움 $^{9}_{4}Be$ 의 원자핵을 $^{4}_{2}He$ 의 원자핵으로 타격하면 탄소원

자와 중성자가 생긴다. 핵반응에서 한개의 탄소핵이 생겼을 때 질량결손은 얼마이며 방출되는 에네르기는 몇MeV인가? 여기서 ${}^{9}_{4}Be$의 질량은 9.012 2D, ${}^{4}_{2}He$의 질량은 4.002 6D이다.

(**답.** 0.006 13D, 약 5.7MeV)

12. ${}^{7}_{3}Li$ 핵에 양성자를 10^{-14}m 접근시키려고 한다. 얼마의 에네르기를 소비하여야 하는가? (**답.** 0.432MeV)

13. 양성자에 느린 중성자가 부딪치면 ${}^{1}_{1}H+{}^{1}_{0}n\rightarrow{}^{2}_{1}D+\gamma$ 와 같이 중수소핵이 얻어지고 γ량자가 나간다. 중성자의 처음운동에네르기를 령으로 보고 γ량자의 에네르기와 파장을 구하여라. 중수소핵의 질량은 2.014 1D이다.

(**답.** 약 1.7MeV, 7.23×10^{-13}m)

14. 원자에네르기를 얻기 위하여 ${}^{235}_{92}U$의 핵분렬을 리용한다. 천연우라니움은 대부분 ${}^{238}_{92}U$ 이다. 이것을 농축하여 ${}^{235}_{92}U$ 의 포함률을 20%로 하였을 때 농축우라니움 10kg속에 ${}^{235}_{92}U$ 가 몇개 들어있는가? 또한 ${}^{235}_{92}U$ 가 모두 분렬될 때 나오는 에네르기를 구하여라.

(**답.** 5.1×10^{24}개, 1.632×10^{14}J)

15. 바다물 1kg속에 들어있는 중수소를 갈라내여 핵융합반응을 일으키면 평균 2 500kW·h의 에네르기를 얻는다. 바다물 1t에서 얻는 에네르기는 발열량이 3×10^{7}J/kg인 석탄 몇t을 태울 때 얻는 에네르기와 같은가? (**답.** 300t)

16. 전자는 왜 자발적으로 다른 립자로 전환되지 않는가?

17. 전자와 양전자가 어떤 거리 r만큼 떨어져있다. 그것들사이의 중력호상작용과 전자기적호상작용의 비를 구하여라.

(**답.** 2.4×10^{-43})

복습문제(2)

1. 천연우라니움 4g속에는 동위원소 ${}^{235}_{92}U$ 가 몇개 들어있는가? 천연우라니움에는 동위원소 ${}^{238}_{92}U$, ${}^{235}_{92}U$, ${}^{234}_{92}U$ 가 있다. 이것들의 비률은 각각 0.992 7, 0.007 21, 0.000 055이다.

(**답.** 약 7.38×10^{19}개)

2. 가장 큰 안정한 핵은 비스무트동위원소 ${}^{209}_{83}Bi$ 핵이다. 이보다 더 큰 핵은 왜 불안정한가?

3. 비결합에네르기곡선을 통하여 핵에네르기가 어떤 경우에 방출되는가를 설명하여라.

4. $^{20}_{10}$Ne의 결합에네르기가 160.6MeV이다. 그의 질량을 구하여라.

(**답.** 19.987 5D)

5. α선은 헬리움원자핵의 흐름이므르 β선보다 두배나 큰 전기량을 가진 립자들의 흐름이다. 그러므로 전자보다 더 큰 힘을 받겠는데 왜 β선보다 적게 구부러지는가? β립자의 속도는 α립자의 속도의 15배정도이다. 구면반경의 비를 구하여라. α립자의 질량은 β립자의 7 300배이다.

(**답.** 243.3)

6. $^{226}_{88}$Ra, $^{222}_{86}$Rn, $^{4}_{2}$He의 질량은 각각 226.025 4D, 222.017 5D, 4.002 6D이다. 라디움이 α붕괴때 내보내는 에네르기가 α립자의 운동에네르기로 넘어간다면 α립자의 속도는 얼마인가?

(**답.** 약 1.54×10^{7}m/s)

7. $^{222}_{86}$Rn은 α붕괴하면서 $^{218}_{84}$Po으로 된다. 이때 나오는 립자의 운동에네르기는 5.38MeV이다.

ㄱ) 처음에 $^{222}_{86}$Rn이 정지하고있었다면 α붕괴할 때 $^{218}_{84}$Po핵과 α립자의 속도의 비를 구하여라.

ㄴ) $^{218}_{84}$Po의 운동에네르기는 얼마인가?

ㄷ) $^{222}_{86}$Rn이 α붕괴할 때 질량결손은 얼마인가?

(**답.** 2/109, 9.87×10^{-2}MeV, 0.005 88D)

8. 1μg의 핵 $^{25}_{11}$Na가 있다. 그것의 반감기는 60s이다. 이것이 β붕괴를 한다. 10min후에 $^{25}_{11}$Na의 핵이 몇개나 존재하는가?

(**답.** 2.35×10^{13}개)

9. 식물의 잎에서 빛합성에 의하여 공기속의 이산화탄소를 흡수하고 산소를 내보낸다. 이때 내보낸 산소원자가 흡수된 이산화탄소분자에 있었던것인가 아니면 뿌리로부터 흡수한 물분자에 있었던것인가를 표식원자법으로 어떻게 알아낼수 있는가?

10. X립자가 $^{27}_{13}$Al 핵에 충돌하여 $^{27}_{12}$Mg 핵과 Y립자가 생겨났다. 다시 Y립자가 $^{27}_{13}$Al핵과 충돌하여 $^{24}_{12}$Mg핵과 Z립자가 생겨났다. 이 반응들에서 X, Y, Z는 각각 어떤 립자들이겠는가? 립자들은 널리 쓰이는 립자들이다.

(**답.** 중성자, 양성자, α립자)

11. 리티움핵 ${}^{7}_{3}\mathrm{Li}$ 이 양성자를 받아들이고 2개의 α 립자로 갈라진다. 핵반응식을 쓰고 α 립자들의 운동에네르기합을 구하여라. 양성자의 처음운동에네르기는 무시한다. 리티움의 질량은 7.016 0D, α 립자의 질량은 4.002 6D이다.

(**답.** 약 16.8MeV)

12. 다음 글의 □에 맞는 말이나 수값을 써넣어라. 그리고 핵반응식과 붕괴식을 써라.

${}^{27}_{13}\mathrm{Al}$에 느린 중성자를 쪼이면 중성자가 원자핵에 포획되고 그 대신 γ 선을 내보내며 □가 하나 많은 동위원소 □이 생긴다. 이 핵은 □붕괴에 의하여 □가 하나 많은 ${}^{28}_{14}\mathrm{Si}$ 로 변한다. 이 핵은 인공□인데 그의 반감기는 2.3min이므로 □은 □min후에 1/8로 줄어든다.

13. 중성자에 의한 ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$ 핵 한개의 분렬반응에서 약 200MeV의 에네르기가 나온다. 출력이 100MW인 반응로에서 ${}^{235}_{92}\mathrm{U}$핵 1kg은 얼마동안 사용할수 있는가?

(**답.** 약 9.5d)

14. 중수소와 3중수소의 융합반응에서 1MW의 출력을 내기 위해서는 중수소와 3중수소가 1s동안에 얼마나 소비되여야 하는가? 매 융합반응시 나오는 에네르기는 17.6MeV이고 중수소핵의 질량은 $m_{\mathrm{D}}=3.343\times10^{-27}$kg, 3중수소핵의 질량은 $m_{\mathrm{T}}=5.007\times10^{-27}$kg이다.

(**답.** 약 1.19×10^{-9}kg/s, 약 1.78×10^{-9}kg/s)

15. 양전자가 물질속에서 정지하면서 전자와 소멸반응을 한다.(쌍소멸) 만일 이 과정에 꼭같은 에네르기를 가진 세개의 빛량자가 생긴다면 매개 빛량자의 에네르기와 파장은 얼마이겠는가? 그리고 복사되는 빛량자들은 소멸반응이 진행된 점에서 서로 어떤 방향으로 나가겠는가? 전자의 정지에네르기는 0.511MeV이다.

(**답.** 0.34MeV, 3.65×10^{-12}m, 120°)

16. 소립자들의 전자기적호상작용과 중력호상작용의 공통점과 차이점은 무엇인가?

제8장. 나노기술의 기초

위대한 령도자 **김정일**대원수님께서는 다음과 같이 말씀하시였다.

《정보기술, 나노기술, 생물공학은 현시대 과학기술발전의 핵심기초기술입니다.》

현시대는 과학과 기술의 시대이다.

과학과 기술은 지금 세계적으로 비상히 빠른 속도로 발전하고 있는데 그중에서도 정보기술, 나노기술, 생물공학은 모든 최신과학기술의 발전과 밀접히 련관되여있다.

최근에는 과학기술분야에서뿐만아니라 일상생활에서도 나노기술, 나노재료라는 용어를 자주 쓰며 나노재료제품들이 나오기 시작하였다.

제1절. 나노기술

나노라는 말은 원래 그리스어로 매우 작다는 뜻으로서 길이, 질량, 시간과 같은 량들의 크기를 나타낼 때 기준량에 비하여 작아지는 정도를 표시하는 앞붙이이다.

다시말하여 나노란 마이크로(μ)와 피코(p) 즉 10^{-6}과 10^{-12}사이인 10^{-9}을 나타내며 기호 《n》으로 표기한다.

례를 들어 나노뒤에 길이의 단위가 붙은

$$1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$$

는 기준량 1m보다 10억분의 1만큼 작다는것을 의미한다.

1nm의 크기는 데핵산(DNA)의 크기정도이며 그것은 눈으로 볼수 없다.(그림 8-1) 1m와 1nm의 크기를 비교하면 지구와 탁구공정도의 크기로 생각할수 있다.

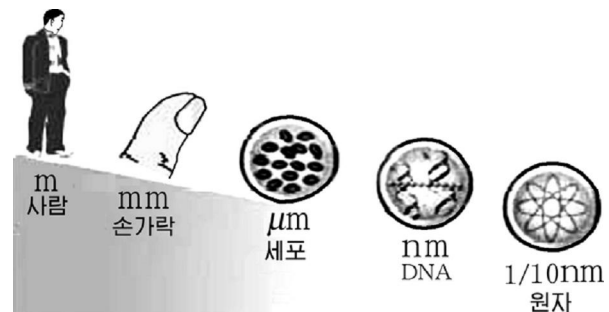



그림 8-1. 1nm의 크기

나노물리학

물리학, 화학, 생물학과 같은 자연과학은 자연을 정복하기 위한 인간의 자주적인 활동과정에 발생하여 발전하여왔다.

그 과정에 사람들은 자연과학의 연구대상을 눈으로 직접 볼수 있는 주위세계의 단순한 자연현상으로부터 해와 달, 행성들의 운동과 은하계와 우주의 운동으로 넓혀나갔다.

또한 사람들은 물질운동의 근원을 밝히면서 분자나 원자와 같은 미시세계에로 연구를 심화시켰다.

20세기말까지 물리학자들은 거시세계에 관한 물리학과 미시세계에 관한 물리학이면 물질의 전체 대상을 다 연구할수 있다고 생각하면서 그 중간크기의 물질에 대하여 특별한 주의를 돌리지 않았다.

※ 고전물리학에서 거시적이라는 의미는 사람이 볼수 있는 가장 작은 대상을 아래한계로 정하고 웃한계는 무한히 넓은 우주에까지 이른다고 보는 크기이고 미시적이라는 의미는 분자, 원자를 가장 큰것으로 보고 아래한계는 무한히 작은 크기라는 뜻이다.

미시세계에 관한 물리학이 발전하여 원자의 속박에서 벗어난 자유전자들이 나타내는 물질의 성질을 연구하기 시작하면서 이 자유전자들의 자유행로가 1nm정도라는것을 알게 되였고 이러한 중간크기를 가지는 물질의 성질을 연구할 필요성이 제기되였다.

이로부터 1981년에 처음으로 중간대역물리학이라는 표현이 나왔는데 이 대역의 크기가 1nm정도이므로 **나노물리학**이라고 부르기 시작하였다.

나노기술과 그 전망

nm척도에서 원자, 분자를 조작하여 구조나 배렬을 조종하고 물질의 새로운 기능이나 보다 우월한 특성을 발현시키기 위한 기술을 **나노기술**이라고 부른다.

나노기술은 많은 현대적인 선진과학기술을 기초로 한 과학기술이며 현대과학(량자력학, 분자생물학 등)과 현대기술(미소전자공학기술, 콤퓨터기술, 고분해능현미경기술, 핵분석기술 등)이 결합된 산물이다.

그것은 앞으로 과학과 기술발전의 추세를 대표하며 또한 현대첨단과학과 새로운 학문발전의 기초로 되게 될것이다.

21세기 과학기술산업에서 중요한 내용을 이룰 나노기술은 나노물리학, 나노화학, 나노생물학, 나노재료학, 나노전자공학뿐아니라 나노공학과 나노가공학을 기본으로 하는 응용과학을 포괄한다. 다시말하여 나노과학기술은 첨단과학과 고도기술의 집합체이다.

나노과학기술이 추구하고있는 최종목표는 인류가 자기의 요구에 따라 하나의 원자와 분자를 마음대로 조종하고 또한 자연계의 물질에 대한 본질을 깊이 탐구하고 연구하는 기초우에서 원자와 분자의 수준에서 전혀 새로운 물질을 설계하고 만들도록 하는것이다.

나노과학기술이 생겨난지는 얼마밖에 안되지만 몇가지 중요한 방면에서 큰 전진을 이룩하였으며 인류가 끊임없이 새로운 기적을 창조해낼수 있게 하는 하나의 《원천》으로 되고있다.

일반적으로 최첨단과학기술이란 현재뿐아니라 앞으로의 사회경제발전에서 결정적의의를 가지며 현대과학기술발전에서 선도적이고 관건적인 역할을 하는 과학기술을 말한다. 새 세기 첨단과학기술의 관건적기초는 다름아닌 나노과학기술이며 21세기는 《 나노시대 》로 될것이라고 예측하고있다.

따라서 21세기 나노과학기술은 사람들의 건강을 증진시키고 생산을 비약적으로 안전하게 높이는데 큰 영향을 줄것이며 최첨단기술의 발전을 좌우하고 21세기 사회경제발전에 큰 영향을 줄것이다.

일화 나노기술의 선구자들

《 나노기술 》이라는 개념을 내놓은 사람은 물리학자 페인먼이다. 그는 1959년에 나노기술을 리용하면 전세계에 있는 모든 책의 정보를 한알의 모래알에 수록할수 있다고 말하였다. 그 근거로는 정보 1bit를 한 변에 원자가 5개씩 있는 바른6면체로 나타내면 1bit당 원자수는 5×5×5=125로 되며 전세계에 있는 2 400만권의 책에 있는 정보전체를 수록하는데는 모래알보다 더 작은 물체가 있으면 된다는것이다.

1959년은 IC가 갓 발명된 시기이며 《소형화》기술에 대한 관심이 급격히 높아지고있던 이 시기에 페인먼자신은 물론 대다수가 설마 이 착상이 인차 달성되리라고는 애당초 생각을 하지 못하고있었다.

그런데 그때로부터 11개월 후에 마크레란이 직경이 0.01mm인 에나멜동선을 직경 0.008mm인 축에 감아서 잘 돌아가는 전동기를 만들었다. 물론 이 전동기는 《나노기계》와는 전혀 다른 《마이크로기계》에 해당되는것이였다. 말하자면 지금의 전동기의 부속품을 무한히 작게 하여 그것을 조립한 《깎아내는 방식》으로 만들어낸것이다.

한편 에리크 드렉스라는 원자나 분자를 조작하여 《조립하여 쌓는 방식》으로 《분자기계》를 내놓았다.

참고 왜 지금 나노기술을 떠드는가

지금 나노기술을 발전시키는것이 세계적추세로 되고있는것은 《오늘》이라는 시대적배경과 관련된다.

오늘의 시대는 과학과 기술이 급속히 발전하여 이전의 기계제산업으로부터 정보산업으로 이행하고 새로운 산업들이 출현하는 시기, 나노기술에서 매우 중요한 요소들인 《관찰하는 기술》, 《미세하게 가공하는 기술》, 《밑으로부터 쌓아올리는 기술》이 갖추어져 《나노》령역에 발을 들여놓은 시기, 나노세계에서 매우 중요한 기능을 담당하고있는 새로운 세계들이 밝혀진 시기이다. 특히 중요한것은 여러 분야에서의 과학기술이 nm크기에서 물질구조나 배렬을 조종하는 시대에 들어섰다고 볼수 있다.

지난 시기 새롭고 흥미있는 물성을 나타내는 사실로부터 기대를 모으는 거시-미시사이의 중간령역의 물리학, 초분자분야의 화학, 나노생물, 나노기계 등이 제각기 독립적인 기술로 여겨왔으나 공통점이 많고 거의 차이가 없다는데로부터 서로의 련계를 강화하고 하나의 목적을 지향하는 방향으로 나가고있다. 따라서 나노기술에 대한 연구는 나노라는 하나의 공통된 인식을 가지고 통일적으로 진행하는것이 가장 합리적인 방도라고 할수 있다.

문제

1. 원자의 크기와 빛파장을 nm로 표시하여라.
2. 1nm의 크기를 사과 1알의 크기로 생각하면 1m는 지구크기의 몇배로 볼수 있는가?
3. 전기마당에서 1 000V에 의하여 가속된 전자의 파장은 몇nm이며 이것은 원자크기의 몇배와 맞먹는가?

제2절. 나노재료

나노재료

크기가 nm정도인 초미립자들로 된 물질들은 보통의 덩어리물질에서는 볼수 없는 새로운 특성을 나타낸다.

나노기술로 만든 나노정도의 크기를 가진 초미립자를 **나노립자**라고 부르며 나노립자들의 응집체를 **나노재료**라고 부른다.

나노립자는 보통의 미분립자보다 작으며 광학현미경으로 관찰할수 없다.

실례로 적혈구의 크기는 7 000～9 000nm, 세균의 크기는 2 000～3 000nm이므로 광학현미경으로 볼수 있으나 비루스의 크기는 수십nm로서 광학현미경으로 볼수 없다.

나노재료의 분류

나노재료는 그것의 크기에 의하여 특성이 나타나므로 크기로 나타내는 형태에 따라 분류할수 있다.

나노기술이 발전함에 따라 나노재료의 형태는 더욱더 다양하게 되지만 나노립자들의 공간배렬형식에는 여러가지가 있다.

나노재료가 발전하는 초기에는 나노재료라고 하면 나노립자와 그것으로 이루어진 나노박막과 나노고체를 의미하였다.

현재는 넓은 의미에서 나노재료라고 하면 3차원공간에서 적어도 한개의 차원이 나노크기의 범위에 놓이거나 그것으로 구성되는 재료이다.

우선 나노재료에는 공간에서 3차원크기가 모두 나노정도의 크기인 나노립자가 있다. 이처럼 3차원공간이 모두 나노척도인 재료를 **0차원나노재료**라고 부른다.

다음으로 나노재료에는 공간에서 2차원크기가 나노정도의 크기인 나노선, 나노봉, 나노관과 같은 선모양의 재료가 있다. 이처럼 공간에서 두개의 차원이 나노척도인 재료를 **1차원나노재료**라고 부른다.

또한 나노재료에는 공간에서 1차원크기가 나노정도의 크기인 초박막, 다층막과 같은 곡면모양의 재료가 있다. 이처럼 공간에서 한개의 차원이 나노척도인 재료를 **2차원나노재료**라고 부른다.

우에서 보는바와 같이 나노재료는 이상하게도 공간에서 몇개의 차원의 크기가 나노척도에 놓였는가를 평가하지 않고 반대로 몇개의 차원의 크기가 나노척도에 도달하지 못하였는가로 분류한다.

이러한 나노재료들은 구성성분이 단일하고 하나의 상으로 이루어졌기때문에 **나노결정** 또는 **나노상재료**라고 부른다.

이밖에도 나노립자들이 결합되여 이루어진 나노물체(덩어리)가 있는데 이것을 **3차원나노재료**라고 부른다.

여러가지 나노물질

분 류	모 양	실 례
0차원	구모양	원자클라스터 나노립자
1차원	침 상	나노관 나노선
2차원	박막형	나노박편 나노띠 나노박막
3차원	덩어리형	나노사기 나노금속 초살창반도체

나노재료에는 여러가지 형태의 나노결정들을 결합시켜 물리적, 화학적 및 기계적성질이 특이한 **나노복합재료**도 있다.

나노복합재료는 나노립자와 나노덩이, 나노박막의 복합재료이다. 즉 각이한 차원의 나노재료들이 복합되여 생긴 재료이다.

나노복합재료는 나노단순재료와는 달리 복합성분들중의 어느한 종류의 재료의 립자크기가 나노크기를 가진 복합재료이다.

나노복합재료를 형성하면 종래의 거시적 및 미시적복합방법에서는 얻을수 없던 성질을 나타낸다. 또한 당김세기, 튐성률, 열변형온도 등의 성질이 비약적으로 좋아진다.

몇가지 대표적인 나노재료

나노물질은 다양한 형태와 구조를 가지는데 그가운데서 가장 전형적인 나노재료는 탄소나노재료이다.

C_{60}플러렌. 일반적으로 덩어리재료의 탄소물질로는 흑연과 금강석이 알려져있다.

흑연의 구조는 탄소원자가 6각고리그물모양을 형성하면서 층상으로 배렬되여있으며 금강석의 구조는 탄소원자가 4면체로 견고하게 결합되여있다.(그림 8-2) 이러한 결정구조의 차이로 하여 흑연은 무른 재료이지만 금강석은 자연계의 물질가운데서 가장 굳은 재료이며 값비싼 보석으로 되고있다. 또한 흑연은 도체이지만 금강석은 반도체이며 색갈도 다르다.

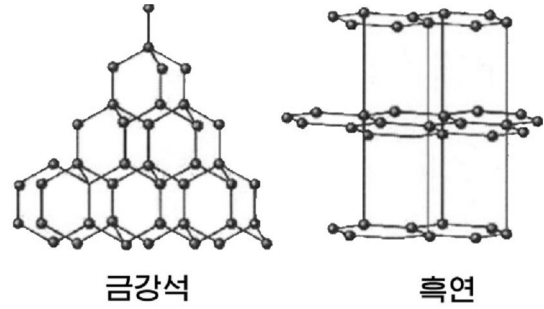



그림 8-2. 탄소동소체의 결정모형

1985년에 탄소원자로 이루어진 축구공모양의 새로운 물질(플러렌)이 발견되였다.

C_{60}플러렌은 12개의 5각형과 20개의 6각형으로 이루어진 32면체구조를 가지고있다. 비교적 잘 연구된 C_{60}플러렌은 탄소원자 60개가 모여 마치도 축구공과 같이 속이 빈 구모양의 구조를 이루고있는데 직경은 약 0.7nm정도이다.(그림 8-3)

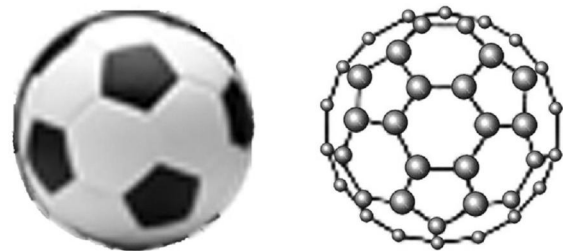



그림 8-3. 축구공모양의 C_{60}플러렌

탄소나노관. 지금 나노기술분야에서 가장 주목되는 재료의 하나가 탄소나노관이다. 금강석, 흑연, 플러렌(C_{60})에 련이어 탄소의 4번째 형태로서 알려지고있는 탄소나노관은 탄소원자 그자체로부터 만들수 있는 새로운 물질이다.

탄소나노관은 겉면이 탄소원자들의 6각형그물로 이루어진 원통형의 물질이다.(그림 8-4)

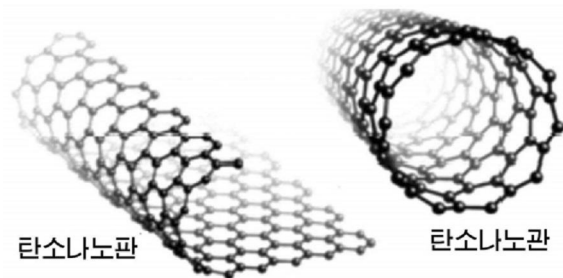



그림 8-4. 탄소나노재료

탄소나노관은 세상에서 제일 가볍고 강한 재료로 불리우고있으며 유연성도 좋다. 탄소나노관의 당김세기는 45GPa

정도로서 강철의 10배이다.

나노관이나 나노선은 직경이 약 1～수십nm이며 길이는 수μm 정도이다.

탄소나노관은 비록 발전력사가 20a도 안되지만 자기의 독특한 기하학적구조와 특이한 물성, 광범한 응용분야로 하여 21세기 《검은 금강석》으로 불리우고있으며 나노과학기술이 급속히 발전하고있는 오늘날 그것의 합성과 응용에 대한 연구는 나노재료연구의 열점의 하나로 되고있다.

나노클라스터. 수～수백개정도의 원자와 분자들이 일정한 형식으로 모여 얻어진 나노초미립자를 **나노클라스터**라고 부른다.

나노클라스터에서는 겉면에 놓여있는 원자의 수가 속에 있는 원자의 수와 비슷하거나 더 크다. 나노클라스터의 자기모멘트는 구성하는 원자수(클라스터의 크기)에 따라 심하게 변한다.

나노클라스터는 일반적으로 덩어리물질이지만 원자에서와는 완전히 다른 물리화학적성질을 가지며 그 성질이 크기에 따라 현저히 변화되는 특성을 가진다. 즉 나노클라스터는 크기를 조절하는데 따라 지금까지 볼수 없었던 기능을 나타낼수 있는 가능성을 가진 물질이다.

나노금속. 금속바탕재료에 여러가지 방법으로 나노립자를 분산시켜 만든 금속재료를 **나노금속**이라고 부른다.

나노금속은 보통금속에서 볼수 없었던 높은 세기와 구부림성, 삭음견딜성을 가질뿐만아니라 수소저장능력이 높고 활성이 강한 전극을 만들수 있는 특수한 성질을 가진다.

나노금속은 구조와 조직을 100nm 아래의 크기로 조절하면 같은 계의 합금보다 우월한 특성을 나타낸다.

나노사기. 나노결정립자로 이루어진 나노다결정체나 나노수준에서의 구조조절이 가능한 무기박막 등 종전의 정밀사기에 나노구조조절기술을 도입한 재료를 **나노사기**라고 부른다.(그림 8-5) 이것들은 지금까지 볼수 없었던 초고강도의 기계적성질, 전자기적성질을 가진다.

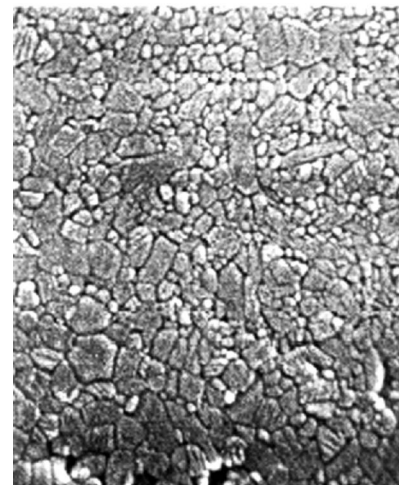



그림 8-5 사기미세조직

나노사기는 금속산화물이나 질화물, 탄화물 등의 무기재료구조를 나노급으로 만든것이다.

보통의 정밀사기에서 결정립자의 크기는 0.1～수μm인데 나노사기에서는 수nm정도이다.

나노재료의 성질

물질이 크기가 작아져 nm크기의 초미립자로 되면 덩어리재료와는 완전히 다른 새로운 성질이 나타난다. 그것은 나노재료가 거시세계와 미시세계사이에 있는 중간세계의 물질이기때문이다.

보통립자의 크기를 100nm보다 작게 하면 녹음점이 낮아지고 증기압이 높아지며 활성이 커지고 기계적성질, 전기 및 자기적성질, 열 및 광학적성질 등의 물리적성질과 력학적성질들에서 특이한 현상이 나타난다.

우선 나노립자들은 활성이 매우 커진다. 실례로 Cu의 립자반경을 100nm로부터 10nm, 1nm까지 작게 하면 비겉면적(단위질량당 겉면적)은 6.6m^2/g, 660m^2/g까지 증가하며 겉면에네르기는 590J/mol로부터 5 900J/mol, 59 000J/mol까지 증가하여 높은 활성상태에 놓이게 된다. 때문에 나노금속립자들은 공기중에서 폭발적으로 연소되며 촉매효과가 훨씬 높아진다. 립자를 나노화하면 소결온도가 낮아지고 소결속도는 약 10^{12}배나 커진다.

다음으로 립자를 나노화하면 재료의 기계적성질지표가 현저히 높아진다. 실례로 나노동은 일반동보다 세기가 5배 높고 연신률이 5 000％로 매우 좋은 소성을 가지며 경화현상이 없다.

또한 나노재료는 전기적성질도 크게 변한다. 일반동은 전형적인 도체이지만 나노동은 부도체이며 강자성체초미립자들은 나노크기에서 강자성을 잃고 상자성을 나타내며 금속초미립자들은 10nm 이하의 크기에서 전기적으로 중간성질을 나타낸다.

그리고 나노립자들은 같은 재질의 거시적인 덩어리물체가 가지지 못하는 새로운 광학적특성을 나타낸다. 금, 은, 동, 석과 같은 유색금속의 나노립자들은 본래의 색을 잃고 검은색을 띤다. 이것은 나노립자의 크기가 빛의 파장보다 작기때문에 생기는 현상이다. 그러므로 나노재료가 검은색을 띠는것은 그것의 첫째 표징이다.

나노립자들은 보임빛에 대한 반사률이 매우 낮다. 백금나노립자의 보임빛반사률은 1%이고 금나노립자의 반사률은 10%이하이다. 보임빛에 대한 낮은 반사률과 높은 흡수률은 나노금속립자의 크기가 빛의 파장보다 작기때문에 생기는 량자효과이다.

금을 nm크기의 초미립자로 유리속에 분산시키면 맑고 연한 붉은색을 나타낸다. 미세한 금피복은 공예유리의 착색제로 오래전부터 리용되여왔다.

이처럼 나노재료의 성질은 계속 연구되고 리용분야가 늘어나고 있다.

문제

1. 0차원나노재료의 실례를 3가지이상 써보아라.
2. 1차원나노재료와 2차원나노재료의 차이를 실례를 들어 설명하여라.
3. 나노복합재료의 실례를 참고서에서 3가지이상 찾아보아라.

초기나노재료

인공적으로 나노재료를 만든 력사는 적어도 1 000여년전이다. 옛날 사람들은 초가 탈 때 나오는 탄소그을음을 먹의 원료와 착색물감으로 썼다. 이것이 바로 최초의 나노재료라고 말할수 있다. 또한 고대의 동거울걸면의 녹방지층은 분석을 통해 산화석나노립자로 이루어진 박막층이라는것이 밝혀졌다. 그러나 당시 사람들은 이것이 눈으로는 볼수 없는 나노크기의 작은 립자들로 이루어진것이라는것을 몰랐다.

제3절. 나노측정과 나노가공

나노기술의 발전에서 중요한 역할을 하는 요인은 나노측정기술과 나노가공기술이다.

나노측정기술의 기초

나노측정기술에서 중요한 문제의 하나는 우선 나노크기정도의 분해능이다.

현재 길이의 세분화된 눈금에는 인공적으로 길이를 분할한 m 눈금자로부터 시작하여 빛의 간섭현상을 리용한 반파장단위의 눈금, X선의 간섭현상을 리용하여 읽을수 있는 결정살창간격의 눈금들이 있으며 길이의 분해능은 이미 나노령역에 들어서고있다.

형태측정의 분해능도 광학현미경, 전자현미경, 주사탐침현미경 등 각이한 측정원리에 기초하여 높아지고있으며 주사탐침현미경에서는 원자의 배렬모양까지 관찰할수 있다.

나노측정기술에서 중요한 문제는 또한 10^{-9}의 측정정확도를 보장하는것이다. 여기서는 회전위치를 수nrad의 걸음으로 미세하게 조절하는것, 길이를 1nm의 정확도로 측정하는 문제가 제기된다.

리상적인 직선운동과 회전운동을 어느 정도 실현할수 있겠는가 하는것은 나노기술로 필요한 물질을 만들어낼수 있는가 없는가 하는 평가척도로 된다.

나노측정기술은 계속 발전하고있다.

나노측정방법

나노크기의 립자들은 광학적수단으로는 볼수 없다. 그것은 립자의 크기가 빛의 파장보다 작은것과 관련된다.

캄캄한 곳에서 눈으로 볼수 없는 거시물체의 겉면을 손으로 만져보면 형태를 알수 있다. 만일 손을 작은 촉각수감부로 바꾸고 시료겉면을 따라 움직이면 접촉으로 겉면을 느끼는 현미경을 만들수 있다.

여러가지 수감부(탐침)를 겉면을 따라 이동(주사)시키면서 눈에 보이지 않는 시료를 관측하는 현미경을 **주사탐침현미경**이라고 부른다.

주사탐침현미경에는 여러가지가 있다.

원자간력현미경(AFM)은 매우 작은 판형수감부(탐침)끝부분의 원자와 시편겉면원자사이에 작용하는 힘에 의하여 생기는 미세변형으로 시료를 관측하는 주사탐침현미경이다.

원자간력현미경에서는 매우 약한 힘의 작용에 의해서도 예민하게 변형되는 극소형판형수감부의 한쪽에 예리한 탐침이 붙어있고 다른쪽 끝은 고정되여있다. 판형수감부탐침끝부분의 원자와 시편겉

면원자사이에 작용하는 극히 약한 힘에 의하여 판형수감부에 미세한 변형이 생기게 된다.

원자간력현미경에서는 이 변형값을 수감하여 시편겉면의 모양에 대응하는 영상을 얻게 된다.

AFM에서 작은 탐침은 《작은 지레대》로, 자극은 지레대에 가해지는 《원자사이의 힘》으로, 탐침으로 측정되는 응답은 원자사이의 힘에 대한 반작용으로 일어나는 《지레대의 변형》이라고 볼수 있다.

주사굴현미경(STM)은 끝이 뾰족한 금속탐침을 시편겉면우에 가까이 가져다대고 탐침과 시편사이에 전압을 걸어줄 때 굴효과(결정경계에서의 자리에네르기 즉 포텐샬장벽의 높이가 립자의 에네르기보다 클 때 미시립자가 이 장벽을 뚫고 지나가는 현상)에 의하여 생기는 굴전류를 리용하여 시편겉면에서의 원자배치상태를 알아내는 주사탐침현미경이다.

주사굴현미경의 탐침으로는 시편겉면의 원자를 직접 볼수 있을뿐아니라 시편겉면의 원자나 분자들을 조작할수 있다.(그림 8-6)

그림 8-6. 우리 나라에서 만든 주사굴현미경

STM과 AFM은 3차원원자분해능을 가진 현미경일뿐아니라 굴전류와 원자사이의 힘을 측정하는 장치로도 리용되기때문에 원자와 분자를 옮기여 자기 의도대로 배렬할수 있다.

이 수단들은 나노기술의 개척기술이므로 탐침을 보다 예민한것으로 바꾸는 방법으로 새로운 현미경을 만들수 있다.

나노가공

나노재료의 물질을 어떻게 만들겠는가.

나노재료를 얻는데는 크게 두가지 방법이 있다.

그중의 하나는 큰 덩어리물질을 물리적방법이나 화학적방법으로 미세하게 쪼개거나 분할하는 미세분할방법이며 다른 하나는 원

자나 분자와 같이 매우 작은 물질들을 쌓아서 만드는 미세적층방법이다.

최근에 니켈기판우에 크세논원자를 한개씩 옮겨놓는 방법으로 원자급의 쌍극개폐장치를 만들었다. 이처럼 니켈기판우에 원자들을 배렬하는 기술은 지금의 자기원판에 비하여 수십억배나 밀도가 높은 자기원판을 만들수 있게 한다.

문제

1. 나노측정기술의 기초에 대하여 설명하여라.
2. 원자간력현미경의 구조, 동작원리를 설명하여라.
3. 주사굴현미경의 구조, 동작원리를 설명하여라.

작은 진동자로 나노세계를 느낀다

nm크기의 매우 작은 진동자를 만들수 있다.

그 크기는 원자가 수십~수백개 모인 정도이다. 이렇게 작은 진동자는 한개의 원자와 분자가 부착되여도 <무겁다>고 느끼며 주파수가 낮아지므로 매우 약한 힘을 주파수의 변화로써 나타낼수 있다.

원자간력현미경에서 지레대탐침을 진동자로 교체하고 고체시료의 겉면에 닿지 않게 하면서 가까이 가져가면 진동자와 시료사이에 작용하는 원자들사이의 힘을 주파수변화로 나타낼수 있다. 이러한 현미경은 원자 하나의 질량변화를 느낄수 있는 고감도원자간력현미경이다.

제4절. 나노기술의 응용

나노재료의 응용

나노재료들은 인민경제 여러 부문과 우리 생활에 광범히 리용되게 된다.

다층탄소나노관을 리용하면 손바닥만 한 천연색TV를 제작할수 있다. 또한 탄소나노관에 많은 량의 수소를 흡착시키면 전기자동차의 동력원천으로 널리 리용할수 있다. 그리고 나노탄소원뿔겉면에는 Pt촉매가 잘 분산되기때문에 소형수소연료전지의 전극재료로 리용할수 있다. 이러한 연료전지들이 연구개발되면 전자장치들을 수소와

알콜을 에네르기원천으로 하여 동작시키게 될것이다. 탄소나노관과 같이 가볍고 강한 재료들은 앞으로 우주비행선과 같은 대상의 구조재료로 리용할수 있다.

플러렌은 내부에 여러개의 금속원자가 들어갈만 한 공간을 가지고있으므로 불안정한 원자도 플러렌내부에 갇혀지면 껍질의 작용으로 안정하게 유지된다.

C_{60}플러렌은 빛을 받으면 특정한 부위만을 절단하는 작용을 하므로 나노빛수술칼로서 의료부문에서 쓸수 있다.

나노금속은 보통금속과 달리 세기가 크고 내열특성이 매우 좋으므로 기계구조용부분품, 색류선륜, 구부림성이 좋은 안경테를 만들어내고있다.

사기의 구조조직을 나노화하여 나노사기를 만들면 휴대용전화기에 들어가는 축전기도 유전체층을 보다 얇게 함으로써 극소형화, 경량화할수 있다. 이것을 리용하여 손목시계만 한 휴대용무선TV전화기와 같은 정보전자장치의 극소형화를 실현할수 있다.

유리재료에 나노기술을 적용하여 만든 나노유리는 취성이 약하고 가볍기때문에 태양전지용유리기판과 자기디스크, 빛디스크의 기판으로 리용할수 있다. 또한 자동차, 기차, 건물의 창문유리를 비롯하여 에네르기, 환경, 정보 등 넓은 분야에서 리용할수 있다.

μm크기의 미세한 립자겉면에 나노립자를 부착시키면 분말로서의 새로운 성질이 나타나는데 이러한 립자는 부풀지도 않고 줄어들지도 않으며 류동성이 전혀 없는 분말로 된다.

공학분야에서의 응용

정보기술분야에서의 응용. 정보기술분야에서 나노기술이 중요시되는 점을 3가지로 들고있다.

첫째로는 초고집적의 가능성이고 둘째로는 량자효과의 효과적인 리용이며 셋째로는 기능조화집적을 할수 있다는것이다.

실례로 초고집적기술의 종국적인 목표로 되는것이 원자기억소자이다. 원자기억소자의 실례로서 잘 알려져있는것은 도서관을 단 한개의 각사탕안에 집어넣게 된다는것이다. 즉 도서관에 보관되여있는 정보를 사방 1cm의 각사탕만 한 크기의 기억소자에 모두 저축하는 기술이다.

또한 량자효과를 리용하여 전자기구를 발전시켜나갈수 있다. 물질의 크기가 나노크기로 작아질수록 그의 에네르기준위가 띄염띄염 갈라지게 되는 량자효과도 볼수 있다. 나노립자에서는 그안에 갇히운 전자의 에네르기준위의 간격이 넓어지는데 이 효과를 리용하여 푸른색이나 자외선의 레이자를 발생시키는 기술을 개발하고있다.

그리고 기능을 조화시킨 집적을 할수 있다. 이것은 작은 장소에 같은것을 고밀도로 오직 많이 넣기만 하는 초고집적과는 달리 원자, 분자들을 무어나가 여러가지 다른 기능들을 조화시켜 기구를 만든다는것이다.

결국 실례를 들면 사람의 눈과 같이 빛을 느끼는 기능과 그것을 처리하는 기능이 합쳐진것을 만드는 일이 nm의 규모에서 가능하게 된다는것이다.

이것이 기능을 조화시킨 집적기술로서 나노기술에서 가장 기대할수 있는것은 사람의 5감에 대등하거나 5감을 초월하는 감도를 가진 지적수감장치의 기술개발이다.

기능조화집적된 지적수감장치는 정보통신기구의 고성능화, 초소형화, 전력절약화가 실현되여 의료, 공해방지, 화재방지, 로보트 등의 모든 분야에 활용할수 있는데 사람들에게 매우 유쾌한 생활공간을 가져다주게 될것이다.

또한 5감정보통신도 가능하다. 현재의 정보통신은 음성과 화상에 머무르고있지만 지적수감장치로 전달하려는 냄새나 맛을 수감하여 그 스펙트르정보를 상대방에게 전기신호로 보내여 정보를 받는 사람의 냄새를 느끼는 뇌의 부분을 자극하거나 맛을 느끼는 부분을 자극할수 있게 된다면 5감으로 얻어낸 정보를 멀리에 있는 상대방에게 전할수 있다.

광학분야에서의 응용. 사람은 정보의 70%이상을 시각 즉 빛을 통하여 얻고있다. 이것은 사람이 정보를 얻는것과 빛과의 밀접한 관계를 반영하고있다.

지금 빛기술도 나노규모에서 관찰하거나 조종하는것이 중요시되고있으며 나노빛량자기술이 고도정보화를 달성하기 위한 중요한 열쇠로 된다고 보고있다.

빛량자기술은 곧 빛기술이다. 정보통신의 광대역화가 빛통신에 의하여 촉진되는 현실은 지금까지 전자기구에서 진행되여온 일들이 모두 빛에 의한 장치로 진행되여야 하므로 새로운 나노구조빛량자기술재료를 개발하는것이 정보통신분야의 과제로 나서고있다.

통신전파의 주파수는 라지오가 kHz, TV가 MHz, 휴대용전화기는 GHz로서 이보다 더 높은것으로 이행되고있는데 현재는 THz령역에 들어서고있다. 이것은 주파수가 높을수록 더 많은 정보를 전할수 있기때문이다. 그리하여 고주파수의 전자기파가 요구되고있는데 지금까지의 THz주파수의 전자기파발생장치로서는 미약한것밖에 발생시킬수 없었다. 이것이 나노빛량자기술의 연구를 촉진시켰으며 fs(10^{-15}s)급의 레이자빛을 쪼이면서 반도체 같은데 전류를 흘려보내면 효률이 높은 THz급의 전자기파가 발생한다는것이 알려지게 되였다.

문제

1. 정보기술분야에서 나노기술의 응용을 례를 들어 설명하여라.
2. 광학분야에서 나노기술의 응용을 례를 들어 설명하여라.
3. 탄소나노재료의 응용실례를 과학잡지에서 3가지이상 찾아보아라.

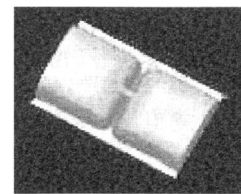
반도체나노소자

한 변의 길이가 1cm정도인 반도체소편에 만들어진 대규모집적회로(LSI)는 반도체기판에 만들어진 미세한 전자요소(스위치작용을 하는 3극소자)들과 이 요소들을 련결하는 배선으로 구성된 많은 전자회로의 집합체이다. 2001년에 약 4 000만개의 반도체3극소자가 집적된 LSI가 광범히 리용되였다.

그림 8-7
단전자 3 극소자

나노기술을 리용하면 3극소자의 집적도를 비약적으로 높일수 있다. 여기서 중요한것은 3극소자의 크기와 함께 동작에 필요한 전자의 수를 적게 하는것이다.

LSI에서는 한번의 동작에 3극소자 1개당 약 10만개의 전자가 흐른다.

그러나 나노기술을 리용한 단전자3극소자는 전자 1개로 소자를 동작시킨다. 이러한 단전자3극소자 2개를 조합한 역변환기회로가 콤퓨터나 원자간력현미경에 리용되고있다. 이 소자는 종전소자에 비하여 전력소비가 대단히 작고 동작속도가 비할바없이 빠르다.

복습문제

1. 미시립자들인 전자, 핵자들의 물질파의 파장을 nm로 표시하고 나노립자의 크기와 대비하여라.
2. 플러렌과 탄소나노관의 공통점과 차이점을 밝히여라.
3. 나노동결정의 비열은 일반동의 비열보다 크다는것을 비겉면적으로 설명하여라.
4. 나노백금을 촉매로 하면 메틸알콜이 포함되여있는 수용액에서 빛을 쪼여 수소를 생산할수 있다. 어떤 효과를 리용한것인가?
5. 나노립자들의 활성이 커지는것은 겉면에 놓이는 원자들의 비률이 증가하기때문이다. 다음의 자료에 근거하여 나노립자의 직경에 따르는 겉면원자수의 비률의 변화를 그라프로 표시하여라.

나노립자의 크기 d[nm]	겉면원자수	겉면원자수 비률 [%]
10	3×10^4	20
4	4×10^3	40
2	2.5×10^2	80
1	30	99

6. 나노금속립자의 빛에 대한 반사률이 1%이하이다. 나노금속은 어떤 색을 띠는가?
7. 주사굴현미경과 원자간력현미경의 구조, 동작원리, 측정방법에서의 공통점과 차이점을 대비하여 설명하여라.

실 험

1. 흔들이에 의한 중력가속도 측정

실험목적

이 실험에서는 흔들이의 길이와 주기를 재여 중력가속도를 결정한다.

기초지식

흔들이의 기울임각이 작을 때 진동주기는 흔들이의 길이에만 관계되고 추의 질량과 진폭에는 관계되지 않는다. 흔들이의 주기는 다음과 같다.

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$$

이 식에서 중력가속도 g의 값은

$$g = \frac{4\pi^2 l}{T^2}$$

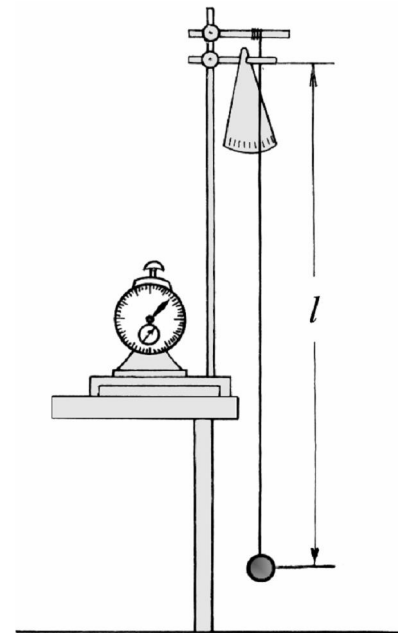
흔들이의 길이(l)와 주기(T)를 재여 중력가속도(g)를 구할수 있다.

기구 및 재료

고정대, 추, 실(1m이상), 초시계, 자, 노기스(또는 마이크로메터)

그림 1. 흔들이

실험방법

1) 그림 1과 같이 흔들이를 만들고 흔들이의 길이 l을 잰다. 흔들이의 길이는 길게 하는것이 좋다.(1～2m이상) 길이를 길게 하려면 실험대의 모서리에 고정대를 놓고 추가 실험대의 아래까지 내려오게 한다. 먼저 실의 길이를 재고 다음 추의 직경을 노기스로 잰다. 그리고 실의 길이에 추의

반경을 더하여 흔들이의 길이를 구한다. 실은 가볍고 질기며 늘어나지 않는것으로 한다.

2) 흔들이를 작은 기울임각(5°보다 크지 않게)으로 기울였다가 놓아 진동하게 하고 n번 진동하는데 걸리는 시간 t를 잰다. 그리고 $T=t/n$에 의하여 주기를 결정한다. 진동하는 회수 n을 50～100번정도로 하고 주기는 소수점아래 2자리까지 계산한다.

3) 흔들이의 길이를 80cm, 60cm정도로 달리하면서 같은 방법으로 실험을 되풀이한다.

결과 및 분석

1) 잰 값을 다음표에 적어넣고 중력가속도값을 계산하고 평균값, 절대오차, 상대오차를 계산한다.

실험번호	흔들이의 길이 l[m]	진동하는 회수 n	시간 t[s]	주기 $T=\frac{t}{n}$ [s]	중력가속도 $g=\frac{4\pi}{T^2}l$ [m/s^2]	평균값 $\overline{g}$	절대오차 Δg	상대오차 $\delta(g)$
1	1							
2	0.8							
3	0.6							

2) 실험결과를 다음과 같이 표시한다.

절대오차 $g=\overline{g}\pm\Delta\overline{g}$(m/s^2), 상대오차 $\delta(g)$를 표시하고 흔들이의 길이와 진동하는 회수에 따라 실험결과가 어떻게 달라지는가를 따져본다.

3) 오차원인을 분석한다.

문제

1. 흔들이의 기울임각을 너무 크게 하면 실험에서 오차도 커진다. 왜 그런가?
2. 흔들이의 주기를 정확히 측정하기 위하여서는 어떻게 하여야 하는가?

2. 정상파 연구

실험목적

이 실험에서는 량끝이 고정된 줄에서 정상파가 이루어지는 과정과 정상파의 특징을 관찰하고 줄을 따라 전파되는 파동의 파장

(또는 전파속도)이 무엇에 관계되는가를 밝힌다.

줄에서의 정상파는 그림 2와 같은 장치로 얻는다.

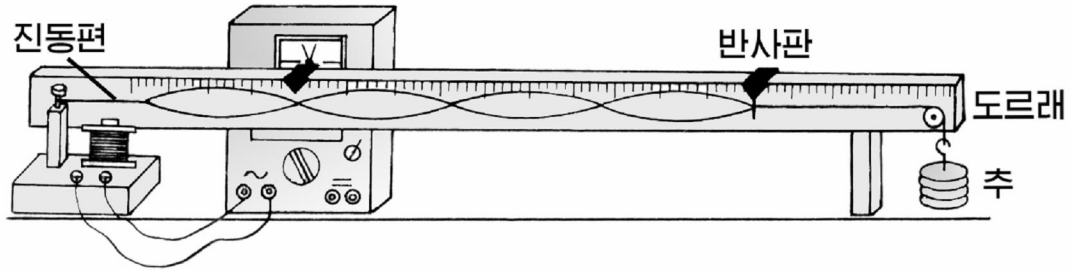



그림 2. 정상파를 관측하는 기구

선륜에 교류가 흐르면 선륜우의 철편이 교류의 주파수에 따라 진동하면서 줄을 통하여 파동이 전파되다가 반사된 파와 겹쳐 정상파를 이룬다. 두끝이 고정된 줄에서 정상파가 이루어질 때 파장은 다음과 같다.

$$\lambda_n = \frac{2l}{n} \quad (n=1,\ 2,\ 3)$$

여기서 l은 줄의 길이, n은 배의 수이다.

기구 및 재료

정상파관측장치(교류진동전자석과 진동판), 추, 교류전원

실험방법

1) 그림 2와 같이 정상파관측장치를 설치한다. 줄의 한끝은 진동편에 고정하고 다른 끝은 반사판과 도르래를 거쳐 추받치개에 걸어놓는다. 추받치개에는 추 1개를 올려놓고 반사판은 오른쪽 끝까지 밀어놓는다.
2) 전원스위치를 닫아 진동을 일으킨다. 반사판을 천천히 왼쪽으로 옮기면서 정상파가 이루어지도록 조절한다. 정상파가 이루어지면 정상파를 관찰하면서 이웃한 두 마디사이에 있는 매 점들의 진폭, 자리각을 따져본다.
3) 정상파가 이루어졌을 때의 줄의 길이를 재고 배의 개수를 세여 기록한다.
4) 반사판을 천천히 왼쪽으로 옮기면서 배가 하나 남을 때까지 정상파가 이루어지는 배의 개수와 줄의 길이를 측정한다.
5) 추의 개수를 하나씩 늘이면서 우에서와 같은 실험을 되풀이한다.

결과 및 분석

1) 잰 값들을 표에 적어넣고 파장과 평균파장을 계산한다.

추의개수	실험 번호	줄의 길이 l [cm]	배의 개수 n	파장 $\lambda_n = \frac{2l}{n}$	평균 파장 $\bar{\lambda}$
1	⋮				
2	⋮				
3	⋮				

2) $\bar{\lambda}$와 λ의 값들을 비교하면서 오차원인을 밝힌다.
3) 진동수와 추의 개수가 일정할 때 파장이 줄의 길이에 관계되는가를 밝힌다.
4) 줄을 당기는 힘이 커질 때(추의 개수를 늘일 때) 파장이 어떻게 변하는가를 밝힌다.
   ※ 추를 쓰지 않고 튐성결수가 적당한 용수철을 리용하여 줄의 장력을 조절할수 있다.

문 제

1. 진동수가 일정할 때 주어진 줄을 따라 퍼지는 파동의 전파속도는 무엇에 관계되는가?
2. 정상파와 전파되는 파동을 비교해보고 다른 점을 밝혀라.

3. 공기기둥의 공명에 의한 소리의 파장 측정

실험목적

이 실험에서는 공기기둥의 공명현상을 리용하여 소리의 파장과 진동수를 측정한다.

기초지식

그림 3에서 보는바와 같이 한끝이 열린 관의 끝에서 수화기를 울리고 관의 길이를 증가시킬 때 수화기에서 나는 소리의 진동수와 관의 고유진동수가 같아질 때마다 공기기둥에서 공명이 일어난다.

첫 공명이 일어날 때의 판의 자리 A_0과 다음번 공명이 일어날 때의 판의 자리 A_1사이의 거리를 l이라고 하면 $l=\lambda/2$이므로 파

장은 $\lambda=2l$ 로 된다. 공기기둥속의 소리의 전파속도를 v라고 하면 소리의 진동수는 $v=\lambda\nu$ 에 의하여 $\nu=v/\lambda$ 와 같다. 따라서 소리가 크게 들리는 두 점사이의 거리를 재면 소리의 파장과 진동수를 구할수 있다.

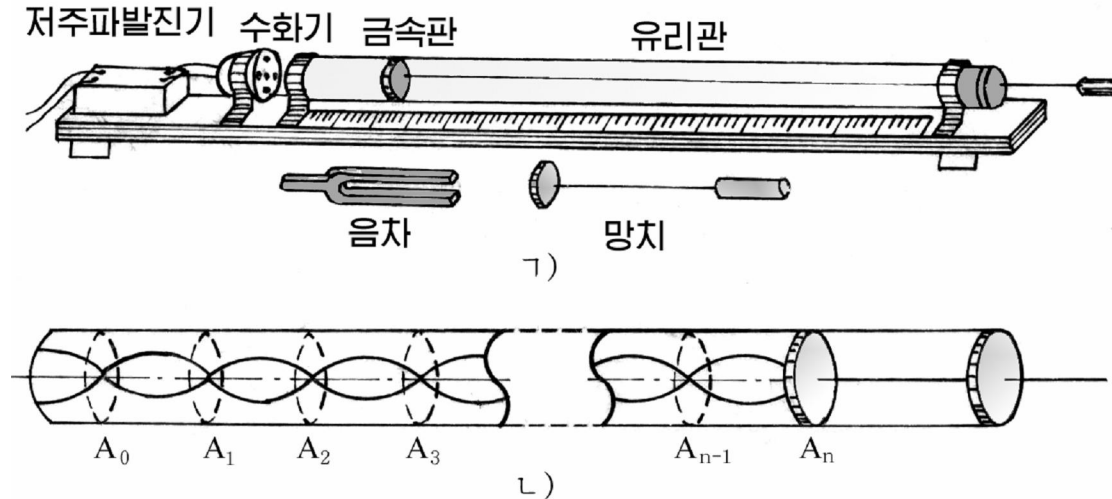



그림 3. 소리의 파장측정기구

기구 및 재료

직경이 3～4cm정도인 유리관과 판이 달린 피스톤, 저주파발진기와 수화기, 눈금자, 방안온도계

실험방법

1) 그림 3과 같이 기구를 설치하고 피스톤을 유리관속에 끝까지 밀어넣는다.
2) 유리관의 열린 끝에서 수화기를 울리고 피스톤을 천천히 오른쪽으로 당기면서 소리가 제일 크게 들릴 때의 자리 A_0을 찾는다.
3) 수화기가 계속 울리게 하고 피스톤을 천천히 당기면서 두번째로 소리가 크게 들릴 때의 자리 A_1를 찾는다. 그리고 A_0, A_1 사이의 거리 l_1를 구한다.
4) 우와 같은 방법으로 소리가 크게 들릴 때의 판의 자리 A_2, A_3, …을 계속 찾고 이웃한 두 점사이의 거리 $l_2=A_1A_2$, $l_3=A_2A_3$, …를 재여 비교해본다.
5) 첫점 A_0과 끝점 A_n사이의 거리를 재고 이 구간의 개수 n으로 나누어 두 점사이의 평균거리를 구한다.
6) 방안의 온도를 잰다.

결과 및 분석

1) 잰 값을 다음표에 적어넣고 $l_1, l_2, l_3, \cdots$ 들과 $\bar{l}$ 을 비교해본다.

소리가 크게 들리는 이웃한 두 점사이의 거리 l					파장	방안 온도 [℃]	소리의 속도 [m/s]	진동수 [Hz]
$l_1 =$ A_0A_1	$l_2 =$ A_1A_2	$l_3 =$ A_2A_3	$\cdots$	$\bar{l} = \frac{A_0A_n}{n}$	$\lambda = 2\bar{l}$	t	$v = 331.5+0.6t$	$\nu = \frac{v}{\lambda}$

2) $\lambda = 2\bar{l}$ 에 의하여 소리의 파장을 계산한다.
3) $v = 331.5 + 0.6t$ 에 의하여 속도를 구하고 $\nu = v/\lambda$ 에 의하여 소리의 진동수를 구한다.

문제

1. 피스톤의 자리를 옮기는데 따라(공기기둥의 길이가 변하는데 따라) 왜 큰 소리가 되풀이하여 들리는가?
2. 같은 음원으로 실험할 때 방안의 온도가 달라지면 실험결과가 어떻게 되겠는가? 달라지는 값과 달라지지 않는 값을 지적하여라.

4. 에돌이살창에 의한 빛의 파장 측정

실험목적

이 실험에서는 에돌이살창으로 빛의 에돌이간섭무늬를 얻어 빛의 파장을 측정한다.

기초지식

광원(하나의 실틈이 있는 가림판)으로부터 평행빛선이 살창면에 수직으로 에돌이살창에 입사하면 에돌이살창의 모든 틈들은 요소파의 파원으로 되고 간섭성파원이 되므로 에돌면서 중첩되여 에돌이간섭무늬를 눈의 망막에 맺는다. 이것을 가상적으로 연장하면 가림판우에 생긴 무늬로 보인다.(그림 4)

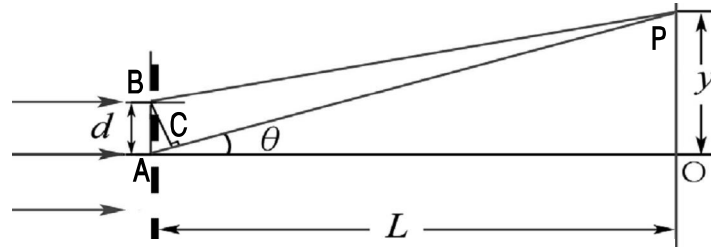



그림 4. 에돌이살창에서 빛의 에돌이

에돌이각을 θ, 살창상수를 d 라고 하면 극대조건은

$$d\sin\theta = k\lambda \qquad (k=0,\ 1,\ 2,\ \cdots)$$

이 식에서 k=0이면 $d\sin\theta=0$ 이고 가림판의 중심 O에 0차 에돌이극대가 생기고 k=1이면 0차에돌이극대의 량쪽에 각각 1차에돌이극대가 생긴다. 에돌이살창에서 비춤판까지의 거리를 L, 중심 O로부터 k차극대점 P까지의 거리 OP를 y 라고 하면 $\theta = \angle OAP = \angle ABC$ 이고 θ 가 매우 작으므로

$$\sin\theta = \tan\theta = \frac{y}{L}$$

따라서 극대조건은 $d\dfrac{y}{L} = k\lambda$

k=1이면

$$d\frac{y_1}{L} = \lambda$$

여기서 알수 있는것처럼 살창상수 d를 알고있으면 L 과 y 를 재여 파장 λ를 결정할수 있다.

기구 및 재료

에돌이살창(살창상수 d 가 주어진것), 실틈이 있는 눈금이 새겨진 가림판, 광원, 고정틀, 자, 빛거르개(붉은색, 풀색, 보라색)

실험방법

1) 가림판으로부터 L (1m정도)만큼 떨어진 곳에 에돌이살창을 설치한다. 가림판에는 눈금이 새겨져있으며 실틈과 극대자리를 나타내기 위한 이동표시기가 설치되여있다.(그림 5)

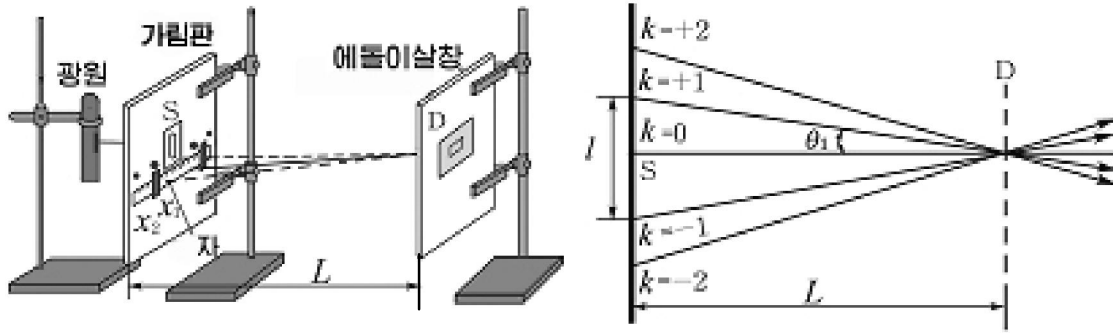



그림 5. 에돌이살창에 의한 파장측정장치

2) 실틈뒤에 붉은색거르개를 끼운 광원을 켜놓고 에돌이살창을 통하여 에돌이무늬를 관찰한다. 그리고 실틈의 량쪽에 나타난 두 붉은색빛의 1차극대자리에 이동표시기들을 맞추고 그사이 거리를 잰다.
3) 같은 방법으로 보라색빛거르개를 끼워넣고 보라색빛의 1차극대점들사이의 거리를 잰다.
4) 계속하여 앞에서와 같이 풀색빛의 1차극대점들사이의 거리를 잰다.

결과 및 분석

1) 잰 값들을 표에 적어넣고 여러가지 색빛들의 파장을 결정한다.

실험 번호	살창 상수 d	빛의 색	가림판까지의 거리 L	1차극대점들사이의 거리 l	극대점과 중심사이의 거리 $y=\frac{l}{2}$	파장 $\lambda = d\frac{y}{L}$
1		붉은색 경계				
2		보라색 경계				
3		풀색 중심				

2) 실험결과로부터 보임빛파장의 범위를 구하여 교과서에 지적된 값과 비교하여본다.
3) 오차원인을 분석한다.

문 제

1. 백열전등에 의한 에돌이무늬는 왜 색을 띠는가?
2. 에돌이살창상수가 크면 실험에서 어떤 영향이 있겠는가?